

Universidad Carlos III de Madrid

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



Grado en Ingeniería Mecánica

Proyecto Fin de Grado

CÁLCULO DE LA VIDA A FATIGA DE UN EJE FERROVIARIO DAÑADO

Autor: Juan Carlos Vázquez Olmo

Tutor: Juan Carlos García Prada

Junio 2017





Título: Cálculo de la vida a fatiga de un eje ferroviario dañado

Autor: Juan Carlos Vázquez Olmo

Tutor: Juan Carlos García Prada

EL TRIBUNAL

Presidente: SERRANO GARCIA, DANIEL

Vocal: RUIZ JIMENEZ, ALBERTO

Secretario: BUSTOS CABALLERO, ALEJANDRO

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo de Fin de Grado el día 6 de Julio de 2017 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



RESUMEN

Este proyecto se realiza con la idea de llevar a cabo un estudio sobre un eje ferroviario. En concreto, dicho eje forma parte de los bogies de un tren perteneciente a RENFE.

Con dicho estudio, se busca analizar y entender el comportamiento de una grieta que aparece en la superficie del eje, trabajando en condiciones normales, con la idea final de llegar a calcular el tiempo que puede estar el tren en funcionamiento desde que surge la grieta, hasta que el crecimiento de la misma es incontrolable.

Para ello, es necesario el uso de las tensiones de Von Mises y los valores del Factor de Intensidad de Tensiones (FIT) calculados en un estudio previo realizado sobre dicho eje.

Con estos datos previos y utilizando el proceso iterativo que se explicará detalladamente a lo largo del proyecto, se podrá llevar a cabo el cálculo del número de ciclos que puede estar el tren en funcionamiento desde la aparición de la grieta.

PALABRAS CLAVE

Eje ferroviario, Factor de Intensidad de Tensiones, Grieta, Fatiga.

ABSTRACT

This project has been developed with the main aim to invest about a railway axle. The axle chosen belongs to the bogies of a train from to the well-known company RENFE.

Concretely, the principal proposal of this TFG is to study and understand the behaviour of a crack in the axle's surface, working under normal conditions. The final idea is to calculate how long the train could put up with the pressure, from the appearance of the crack to the incontrollable growing of it.

In order to achieve these goals, it has been necessary to apply Von Mises Stress and Stress Concentration Factor (FIT), which were calculated during a prior work about this kind of axle.

Once these datum were compiled and using a specific iterative process, which will be explained in detail through the development of the project, the number of cycles that the crack allows the train to work will be determined.

KEY WORDS

Railway axle, Stress Concentration Factor, Crack, Fatigue.





Índice

INTRODUCCIÓN.....	13
OBJETIVOS.....	16
ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	18
1. Introducción	18
2. Buques Liberty	18
3. Accidentes ámbito ferroviario	19
1 Fatiga.....	24
1.1 Características de rotura por fatiga	24
1.2 Crecimiento de la grieta	25
1.3 Relación vida-esfuerzo.....	26
1.4 Límite de resistencia a la fatiga	28
1.5 Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga	29
1.5.1 Factor de superficie (Ka)	30
1.5.2 Factor de tamaño (Kb).....	31
1.5.3 Factor de confiabilidad (Kc).....	31
1.5.4 Factor de temperatura (Kd).....	32
1.5.5 Factor de modificación de efectos varios (Ke)	32
1.5.6 Factor de concentración de tensiones (Kf)	34
1.6 Caracterización de esfuerzos fluctuantes	36
1.7 Componentes variables de esfuerzo medio y amplitud	38
1.7.1. Criterio de Goodman	38
1.7.2. Criterio de Soderberg	39
1.7.3. Criterio de Gerber	39
1.7.4. Comparación criterios de falla	40
2 Planteamiento del problema.....	43
3 Resultados	59
3.1 Programación Matlab.....	59
3.2 Resultados obtenidos de Matlab	60
3.3 Conversión de los resultados	61
3.4 Influencia de la velocidad en los resultados.....	62
3.4.1 Itinerario 1	62
3.4.2 Itinerario 2	63



CONCLUSIONES.....	65
FUTUROS TRABAJOS	67
PRESUPUESTO GENERAL	69
BIBLIOGRAFÍA.....	73
1. Páginas Web.....	73
2. Documentos escritos.....	74
ANEXO A. PLANO DEL EJE FERROVIARIO	77
1. Ampliación del plano del eje ferroviario	78
ANEXO B. FACTORES CONCENTRACIÓN DE TENSIÓN TEÓRICOS (K_T).....	81





ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rotura del petrolero Schenectady	18
Figura 2. Construcción buques Liberty.....	19
Figura 3. Accidente en la estación de Viareggio, Italia.....	20
Figura 4. Superficie de fractura por fatiga	24
Figura 5. Ley de Paris.....	25
Figura 6. Diagrama S-N.....	26
Figura 7. Resistencia a la tensión 'Sut' vs. límite de resistencia a la fatiga para varios materiales	28
Figura 8. Corrección de la gráfica por medio de la ecuación de Marin.....	30
Figura 9. Distribución de esfuerzos sobre una barra con tratamiento superficial.....	33
Figura 10. Sensibilidad a las ranuras para cargas de flexión y tensión alternantes	35
Figura 11. Sensibilidad a las ranuras para cargas de torsión alternantes	35
Figura 12. Relaciones esfuerzo-tiempo	37
Figura 13. Comparación criterios de falla	40
Figura 14. Valores Factor Intensidad de Tensiones frente a la profundidad en la posición angular de 30°	44
Figura 15. Gráfico ΔK vs. profundidad.....	45
Figura 16. Gráfico máximas tensiones Von Mises vs. Profundidad grieta	47
Figura 17. Barra de sección circular con estrechamiento y entalles sometida a flexión	48
Figura 18. Sensibilidad a las ranuras para cargas de flexión y tensión alternantes	49
Figura 19. Gráfica S-N (Stress-Number of cycles)	50
Figura 20. Ley de Paris.....	51
Figura 21. Zona de crecimiento estable-inestable de la 'Ley de Paris'.....	52
Figura 22. Zona de crecimiento estable de la 'Ley de Paris'.....	52
Figura 23. Diagrama de flujo para el cálculo del crecimiento de grietas	54
Figura 24. Plano del eje ferroviario	77
Figura 25. Sección "W" del plano del eje ferroviario	78
Figura 26. Sección "U" del plano del eje ferroviario	79
Figura 27. Sección "V" del plano del eje ferroviario	79
Figura 28. Sección "X" del plano del eje ferroviario.....	80
Figura 29. Sección "Y" del plano del eje ferroviario.....	80
Figura 30. Barra rectangular con agujero transversal sometida a tracción o compresión	81
Figura 31. Barra rectangular con agujero transversal sometida a flexión simple.....	81
Figura 32. Barra rectangular con dos muescas sometida a tracción o compresión	82
Figura 33. Barra con dos muescas sometida a flexión simple.....	82
Figura 34. Barra rectangular con estrechamiento y entalles sometida a tracción o compresión	83
Figura 35. Barra con estrechamiento y entalles sometida a flexión simple	83
Figura 36. Barra de sección circular con estrechamiento y entalles sometida a tracción.....	84
Figura 37. Barra de sección circular con estrechamiento y entalles sometida a torsor	84
Figura 38. Barra de sección circular con estrechamiento y entalles sometida a flexión	85





ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación S_e/S_{ut} para diferentes tipos de materiales	28
Tabla 2. Coeficientes a y b para la obtención del factor K_a	30
Tabla 3. Factor de confiabilidad K_c	32
Tabla 4. Valores FIT ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) para distintas profundidades a lo largo de un ciclo	43
Tabla 5. Valores ΔK ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) para distintas profundidades a lo largo de un ciclo	45
Tabla 6. Tensiones máximas de Von Mises (MPa) en función de la profundidad y de la posición angular.....	46
Tabla 7. Vida a fatiga de un eje fracturado en función de la velocidad media del tren	64
Tabla 8. Tabla de costes de personal	70
Tabla 9. Tabla de costes de amortización	71
Tabla 10. Tabla de resumen de costes	71





INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los medios y redes de transporte permiten el crecimiento y el desarrollo de un país, ya que gracias a ellos se trasladan tanto personas como mercancías.

En los últimos años, el aumento del ritmo de vida de las personas, ha generado un crecimiento en cuanto a la necesidad del transporte. Este crecimiento, trae consigo la necesidad de mejora en todos los ámbitos del transporte.

Por tal motivo, cobra importancia el ferrocarril, por el hecho de la capacidad que tiene de transportar tanto personas como mercancías al destino elegido a velocidades muy altas. Es por esto, por lo que este medio de transporte se ve cada vez más exigido, esperando que su respuesta ante esta solicitud sea lo más eficaz posible.

Por lo tanto, es importante estudiar los diferentes componentes mecánicos de un tren, con la idea de cubrir esas necesidades cada vez más exigentes, con la mayor seguridad posible. Por ello, hoy en día se están realizando innumerables proyectos centrados y dirigidos hacia esa idea, entre los que podemos sumar los pertenecientes a una de las líneas de investigación que está siguiendo el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, entre los que se incluye este trabajo.

Debido a la importancia de lo enunciado anteriormente, es necesario realizar estudios que reduzcan los fallos mecánicos de los componentes del tren para evitar posibles accidentes, y con ello evitar las grandes pérdidas tanto económicas como materiales que podrían provocar.

En concreto este proyecto se centra en el estudio de un eje no sano, es decir, un eje con una grieta en su superficie. Se va a estudiar la vida a fatiga del mismo, con el fin de determinar el tiempo que puede estar en funcionamiento desde la aparición de la grieta hasta la rotura catastrófica del eje.

Este proyecto va a seguir en la línea de investigación de un trabajo previo llevado a cabo por mí mismo, en el año 2015, del cual utilizaré datos y resultados obtenidos en aquel.

Para llevar a cabo este trabajo, se va hacer uso de las tensiones de Von Mises que soporta el eje y de los Factores de Intensidad de Tensiones alrededor



de la grieta. Para llegar a calcular el número de ciclos que puede estar en funcionamiento el eje antes de que se produzca la rotura final del mismo.

Se va a trabajar a través de un proceso de iteración que nos permitirá obtener las soluciones del problema cómodamente.





OBJETIVOS

El objetivo de este proyecto, perteneciente a la línea de investigación del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, es el estudio a fatiga del comportamiento de un eje ferroviario en cuya superficie ya se ha detectado una grieta, con la idea de llegar a conocer los tiempos de trabajo que puede estar un tren en funcionamiento con mayor precisión de la conocida hasta el momento, pero teniendo siempre muy presentes los factores de seguridad.

Para poder llevar a cabo este objetivo, se ha necesitado realizar diferentes actividades, como por ejemplo:

- Estudio y mejora de conceptos relacionados con la fractura mecánica.
- Introducción al ámbito ferroviario.
- Creación de una metodología para el cálculo de la vida a fatiga en un eje dañado.
- Estudio y mejora de conceptos relacionados con la mecánica de la fatiga.
- Aprendizaje y mejora del programa *Matlab*.





ANTECEDENTES HISTÓRICOS

1. Introducción

La utilización de los materiales ha generado problemas al ser humano desde tiempos ancestrales, hasta nuestra actualidad.

Sirvan como ejemplos, las primeras referencias de uso de materiales por parte del hombre, como son La Edad de Piedra, donde se empezó a trabajar con el conformado de materiales, y la Edad de Bronce y la Edad de Hierro, cuyos principios eran los de realizar herramientas que mejoraran las condiciones de vida de aquellas épocas.

Avanzando en el tiempo, podemos hacer referencia entre otras, a la evolución que han experimentado los materiales utilizados en las innumerables guerras que ha llevado a cabo el ser humano a lo largo de la historia, pasando desde los romanos, por los avances realizados en la época medieval, sin olvidarnos de la Edad Moderna, y por supuesto de la Contemporánea, en la que podemos sin duda destacar, las dos grandes guerras mundiales.

2. Buques Liberty

En las que podemos destacar, los problemas que presentaron los famosos Buques Liberty, que pusieron a prueba el diseño ingenieril con resultados no tan satisfactorios como los esperados.



Figura 1. Rotura del petrolero Schenectady

Sirva para refrendar tal afirmación, los siguientes datos: de los 3000 buques Liberty y 500 petroleros T2 que se construyeron durante la Segunda Guerra Mundial, 1.298 de los buques tuvieron graves roturas y 233 roturas frágiles graves, de los que 12 se partieron literalmente por la mitad.



Figura 2. Construcción buques Liberty

3. Accidentes ámbito ferroviario

A lo largo de la historia, los fallos en los materiales han producido graves accidentes, que han provocado enormes pérdidas económicas y materiales, es por esto por lo que a lo largo de los tiempos se han ido mejorando y perfeccionando el uso de los materiales y el diseño ingenieril de los componentes mecánicos con los que se trabaja habitualmente.

En el mundo ferroviario ha habido accidentes muy importantes a lo largo de la historia. El primer gran accidente provocado por el fallo de un eje fue en el año 1842, cuando el tren que realizaba la línea que une Versalles con París descarriló por un fallo en uno de sus ejes, dejando entre 52 y 200 muertos.

La gravedad de este accidente llevó a los expertos de la época a iniciar estudios de la vida a fatiga de los ejes de los trenes, ya que hasta ese momento el conocimiento en la materia era bastante pobre, para poder reemplazar los

mismos y llevarlos a revisión antes de que se produjera la fractura de un eje, y con ello el descarrilamiento del tren.

No fue hasta 1856-1870 cuando el ingeniero alemán August Wöhler ayudó con sus estudios, a mejorar la vida a fatiga de los ejes de los trenes.

Otro accidente provocado por la rotura de un eje de un bogie es el del año 2009 en Viareggio, Italia, donde se superó la cifra de 20 fallecidos debido al descarrilamiento del tren y la posterior explosión que se generó.



Figura 3. Accidente en la estación de Viareggio, Italia.

La fractura de un eje de un vagón ha sido causa de un gran número de accidentes en el mundo ferroviario a lo largo de la historia, motivo por el cual se han llevado a cabo innumerables estudios para entender el comportamiento de un eje trabajando en condiciones reales. Esto ha permitido perfeccionar los períodos de inspección que se realizan en la industria ferroviaria, hasta llegar a los valores con los que se trabaja en la actualidad.





CAPÍTULO I

MECÁNICA DE LA FATIGA



Índice

1.1	Características de rotura por fatiga	24
1.2	Crecimiento de la grieta	25
1.3	Relación vida-esfuerzo.....	26
1.4	Límite de resistencia a la fatiga	28
1.5	Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga	29
1.5.1	Factor de superficie (K_a)	30
1.5.2	Factor de tamaño (K_b).....	31
1.5.3	Factor de confiabilidad (K_c).....	31
1.5.4	Factor de temperatura (K_d).....	32
1.5.5	Factor de modificación de efectos varios (K_e)	32
1.5.6	Factor de concentración de tensiones (K_f)	34
1.6	Caracterización de esfuerzos fluctuantes	36
1.7	Componentes variables de esfuerzo medio y amplitud	38
1.7.1.	Criterio de Goodman	38
1.7.2.	Criterio de Soderberg	39
1.7.3.	Criterio de Gerber	39
1.7.4.	Comparación criterios de falla	40

1 Fatiga

Se denomina fatiga al proceso por el cual se produce la degeneración de un material sometido a cargas cíclicas, cuyos valores son inferiores a los que provocarían la ruptura de la pieza por tracción.

1.1 Características de rotura por fatiga

La rotura por fatiga se caracteriza por aparecer de manera catastrófica y sin previo aviso, siempre y cuando se lleguen a alcanzar un número de ciclos suficientes.

Este tipo de roturas se suele producir en zonas con gran concentración de tensiones como podría ser una grieta o fisura. Además se pueden apreciar unas marcas características en dichas roturas de las que se puede obtener mucha información de cómo se produjo la rotura.

En la siguiente figura se pueden ver las diferentes marcas:

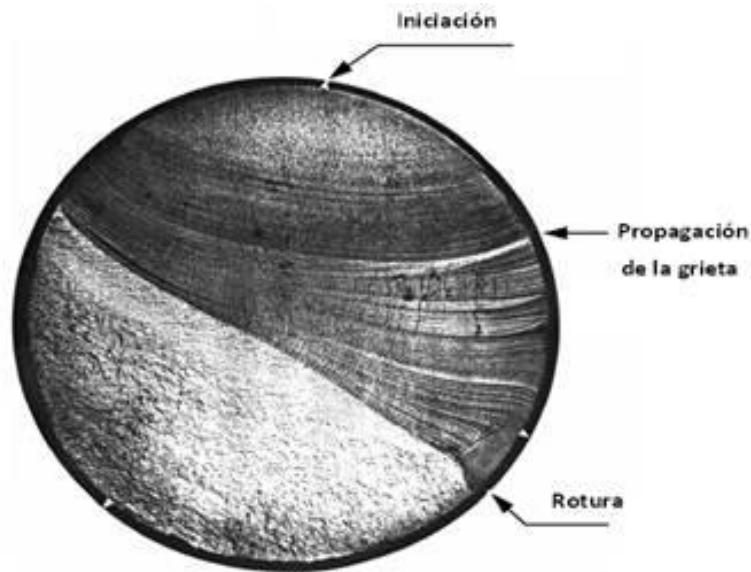


Figura 4. Superficie de fractura por fatiga

- Zona 1: Es la zona que ocupa mayor sección, donde la grieta se propaga lentamente. Se puede distinguir por su aspecto liso y por el carácter asimétrico de las marcas.

- Zona 2: Se caracteriza por un aspecto rugoso e irregular ya que su propagación es la más rápida.

- Zona 3: En esta zona es donde aparece la fractura final, ya que no puede soportar el efecto de las cargas debido a la disminución de sección que ha sufrido la pieza

1.2 Crecimiento de la grieta

El desarrollo de la grieta se caracteriza por tres estados, uno por cada zona de las explicadas anteriormente: el primero, de iniciación de la grieta; después, el de propagación y por ultimo un estado donde la grieta se hace inestable.

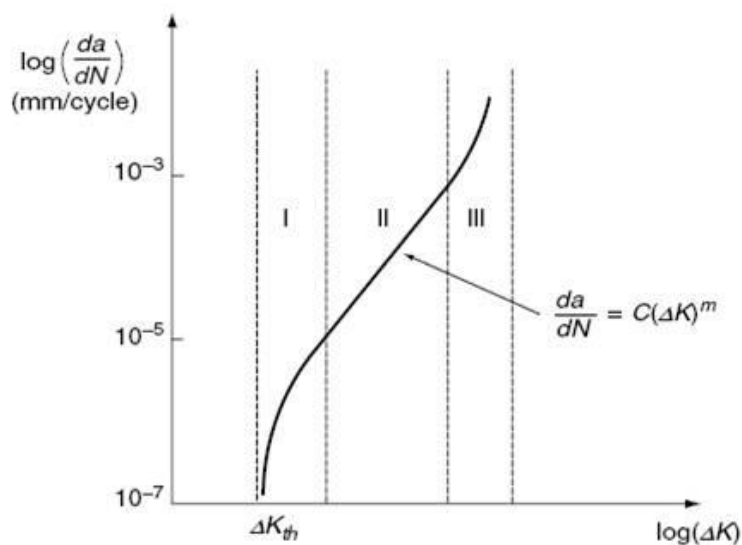


Figura 5. Ley de Paris

Las regiones de crecimiento de la grieta se caracterizan por:

- Inicio de la grieta: aparece una micro grieta debido a que se han creado unas protuberancias en la superficie, generando así una zona con un nivel alto de concentración de tensiones. Dicha grieta es indetectable a simple vista, y muy difícil de apreciar en un estudio por Rayos X.

Al principio, la grieta encuentra mucha dificultad para propagarse, pero esto cambia cuando se aumentan el número de ciclos o el valor de la carga.

- Propagación de la grieta: Cuando la grieta alcanza cierto valor, su crecimiento se produce de manera estable, según la ley que propusieron en 1960 Paris y Erdogan:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_I^m$$

a: tamaño de la grieta

N: número de ciclos

ΔK : rango de intensidad de tensiones

C y m: constantes que dependen del material

- Grieta inestable: en esta zona, la grieta sigue aumentando de tamaño y la sección de material, que soporta la carga, va disminuyendo de tamaño hasta que rompe de forma repentina.

1.3 Relación vida-esfuerzo

Para calcular la resistencia a fatiga de los materiales, se realizan ensayos con cargas variables de valores ya determinados, para conocer el número de ciclos con los que fallaría el material. Se suelen realizar ensayos con la máquina de viga giratoria de alta velocidad de R.R. Moore.

Para poder conocer el comportamiento de los materiales frente a la fatiga se deben realizar un gran número de ensayos debido al carácter estadístico de la fatiga. De esta manera, nos permite obtener diferentes resultados con los que podremos obtener un diagrama que relacione las tensiones de trabajo con el número de ciclos, este grafico se conoce como el diagrama S-N (Stress-Number of cycles)

DIAGRAMA S - N

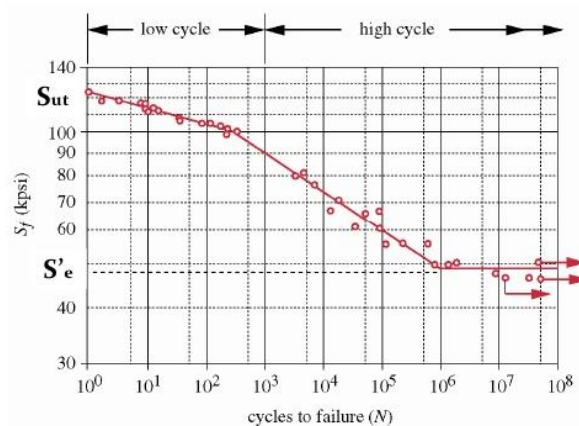


Figura 6. Diagrama S-N



En la figura se pueden diferenciar tres zonas:

- Ciclo bajo: Esta primera zona se caracteriza por tener un número bajo de ciclos, en concreto por debajo de 10^3 ciclos; además el valor de la tensión por rotura disminuye levemente, en torno a un 10% de la tensión última de rotura.
- Ciclo alto: En esta zona intermedia se trabaja entre 10^3 y 10^6 ciclos. En cuanto a la tensión por rotura se aprecia una importante bajada de los valores.
- Vida infinita: La última zona se caracteriza por el cambio de pendiente que experimenta con respecto a la anterior zona, llegando la curva a ser prácticamente horizontal en el caso de los aceros, de manera que el valor de la tensión por rotura se conoce como límite de resistencia a la fatiga 'Se'. En cuanto al número de ciclos, en este caso nos movemos en un número muy alto, por encima de 10^6 .

1.4 Límite de resistencia a la fatiga

Como ya se ha comentado en anteriores apartados, el cálculo del límite a fatiga de los materiales conlleva un gran número de ensayos, que nos permiten obtener gran cantidad de datos que recopilamos en gráficas como la siguiente:

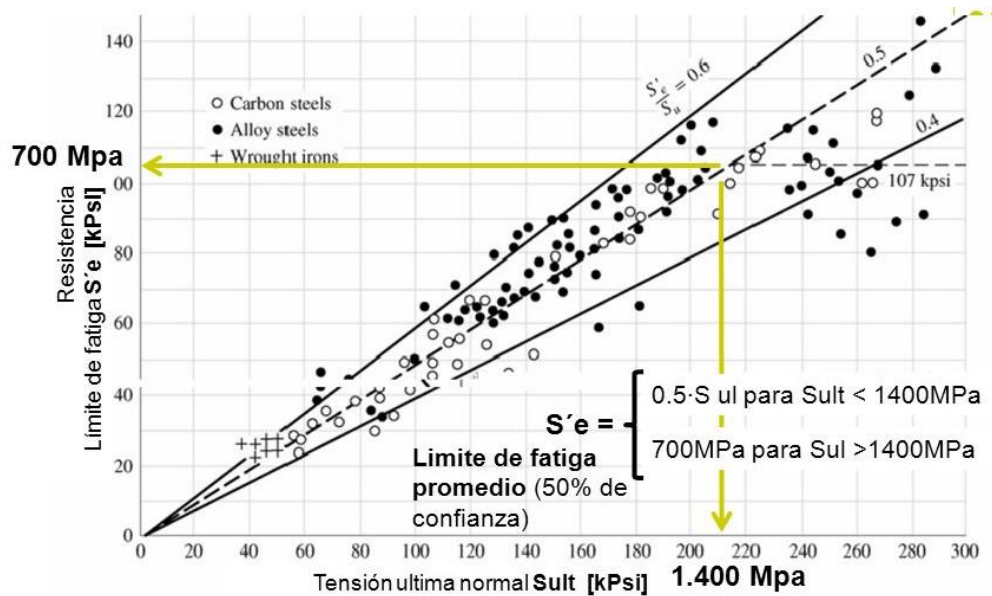


Figura 7. Resistencia a la tensión 'Sut' vs. límite de resistencia a la fatiga para varios materiales

En la siguiente tabla se pueden ver diferentes límites a fatiga para distintos materiales:

Material	S_e/S_{ut}
Acero forjado	0,5
Acero fundido	0,4
Partículas de acero	0,38
Fundición gris	0,35
Fundición maleable	0,40
Fundición modular normalizada	0,33

Tabla 1. Relación S_e/S_{ut} para diferentes tipos de materiales



$$\text{Aceros forjados} = \begin{cases} S_e' = 0.50S_{ut}, & S_{ut} \leq 1400\text{MPa} \\ S_e' = 700\text{MPa}, & S_{ut} > 1400\text{MPa} \end{cases}$$

$$\text{Aceros colados} = \begin{cases} S_e' = 0.45S_{ut}, & S_{ut} \leq 600\text{MPa} \\ S_e' = 275\text{MPa}, & S_{ut} > 600\text{MPa} \end{cases}$$

1.5 Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga

Una vez se han realizado los ensayos y calculado los límites a fatiga, se deben modificar para aproximarlos lo máximo posible a la realidad, ya que hay ciertas diferencias entre las condiciones en las que se realizaron dichos ensayos y las condiciones reales de trabajo.

Estas diferencias pueden deberse al tipo de material utilizado, al entorno de la prueba (temperatura, corrosión...), al modo de fabricación (acabado superficial, tratamiento térmico...) y al diseño.

Marin estudió cómo modificar el límite de resistencia a la fatiga utilizando una serie de parámetros para ajustarlo a la realidad de la siguiente forma:

$$S_e = K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot S_e'$$

K_a : factor de modificación de la condición superficial.

K_b : factor de modificación de tamaño.

K_c : factor de confiabilidad.

K_d : factor de modificación de la temperatura.

K_e : factor de modificación de efectos varios.

S_e' : límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria. [MPa].

S_e : límite de resistencia a la fatiga corregido. [MPa].

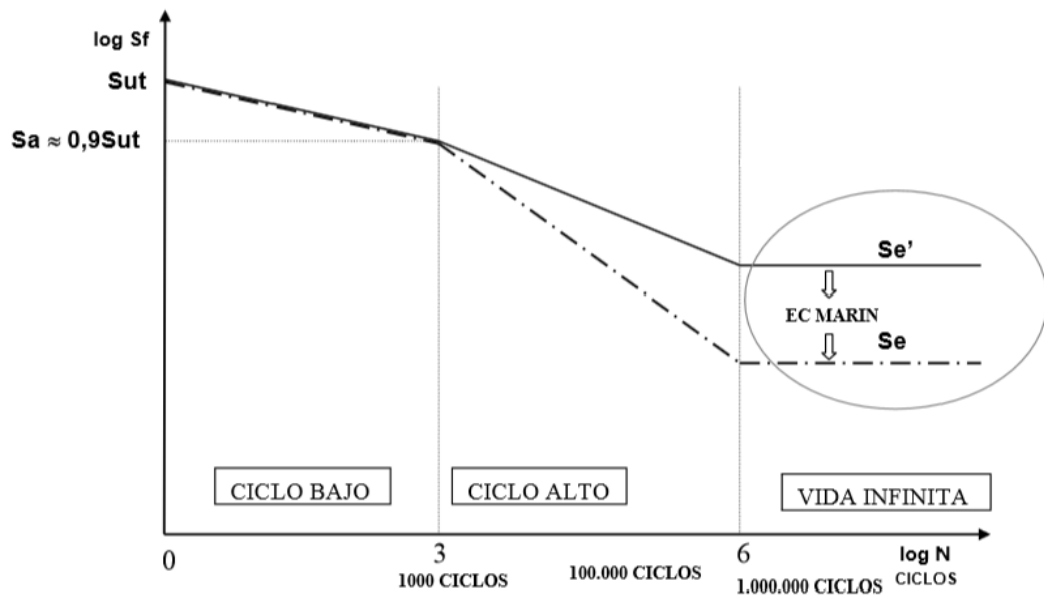


Figura 8. Corrección de la gráfica por medio de la ecuación de Marin.

1.5.1 Factor de superficie (K_a)

El factor de corrección de superficie ' K_a ' depende del tipo de tratamiento superficial al que haya sido sometida la pieza que se está estudiando. Esto se debe a que cuanto mayor rugosidad exista en la superficie, mayor será el nivel de concentración de tensiones y por tanto menor será la resistencia a fatiga del material.

El factor ' K_a ' se puede obtener de la siguiente manera:

$$K_a = a \cdot S_{ut}^b \cdot \ln(1, C)$$

Acabado superficial	a [Kpsi]	a [MPa]	b	c
Esmerilado	1.34	1.58	-0.086	0.120
Laminado en frío	2.67	4.45	-0.265	0.058
Laminado en caliente	14.5	56.1	-0.719	0.110
Forjado	39.8	271	-0.995	0.145

Tabla 2. Coeficientes a y b para la obtención del factor K_a



1.5.2 Factor de tamaño (Kb)

En este caso, este factor va a depender de si la pieza es circular o no, y del tipo de esfuerzo al que esté sometido.

- Probeta circular con carga axial:

$$K_b=1$$

- Probeta circular con flexión y torsión:

$$\text{Factor de tamaño} = \begin{cases} K_b = \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.1133}, & 2.79 \leq d \leq 51\text{mm} \\ K_b = 1.189 \cdot d^{-0.097}, & 52 \leq d \leq 250\text{mm} \end{cases}$$

- Probeta de sección no circular:

En el caso de que la pieza no sea de sección circular, se debe hacer el estudio aproximando una dimensión efectiva por medio de varias ecuaciones.

1.5.3 Factor de confiabilidad (Kc)

Como ya se ha comentado anteriormente, los estudios a fatiga se caracterizan por su carácter probabilístico, lo que nos permite modificar la resistencia en función de la probabilidad de fallo.

Dependiendo del valor de confiabilidad que deseemos, obtendremos un valor para el factor de corrección 'Kc', como se puede observar en la siguiente tabla:

Confiabilidad	Factor de confiabilidad K_c
0.5	1
0.9	0.897
0.95	0.868
0.99	0.814
0.999	0.753
0.9999	0.702
0.99999	0.659
0.999999	0.620
0.9999999	0.584
0.99999999	0.551
0.999999999	0.520

Tabla 3. Factor de confiabilidad K_c

1.5.4 Factor de temperatura (K_d)

Para poder conocer el valor del factor dependiente de la temperatura ' K_d ' es necesario la realización previa de pruebas en el laboratorio para poder determinarlo con garantías. Los valores obtenidos se recogen a continuación:

$$\text{Factor de temperatura} = \begin{cases} K_d = 1, & T \leq 450 \text{ } ^\circ\text{C} \\ K_d = 1 - 5.8 \cdot 10^{-3}(T - 450), & 450 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 550 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases}$$

1.5.5 Factor de modificación de efectos varios (K_e)

El factor ' K_e ' sirve como recordatorio de la influencia que tienen distintos efectos sobre la resistencia a fatiga del material. A continuación se destacan algunos efectos en este ámbito:

Esfuerzos residuales

Este tipo de esfuerzos puede aumentar o disminuir la resistencia a fatiga, dependiendo de si dicho esfuerzo producido en la superficie es de compresión o de tracción. En el primero de los casos, la resistencia a fatiga mejora, mientras que si el esfuerzo residual es de tracción, la resistencia se ve afectada

negativamente. Por lo tanto, las grietas se suelen producir en el caso de esfuerzos de tracción.

Para mejorar la resistencia a fatiga, se suelen realizar operaciones como el laminado en frío o el martillado, donde los esfuerzos producidos son de compresión.

Endurecimiento superficial

En ocasiones, algunas zonas que han sido endurecidas mediante tratamientos superficiales pueden fallar, produciendo grietas en su superficie, en función de los esfuerzos que esté soportando.

A continuación, se puede ver un esfuerzo triangular sobre una barra trabajando a torsión o a tracción.

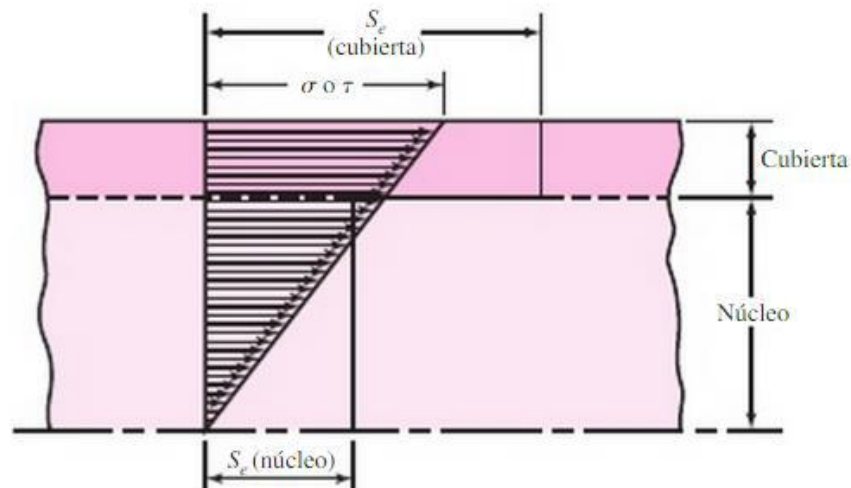


Figura 9. Distribución de esfuerzos sobre una barra con tratamiento superficial

Corrosión

Este efecto influye de manera negativa en la resistencia a la fatiga, ya que la superficie se ve afectada notablemente por las picaduras o el desbastado de los materiales corrosivos.

Recubrimiento electrolítico

Para mejorar la resistencia a fatiga, se utilizan muchas veces recubrimientos metálicos, que pueden llegar a reducir el límite de resistencia a la fatiga un 50%. Otro método utilizado puede ser la oxidación anódica que puede llegar a reducir dicho límite un 40%.



Frecuencia cíclica

La influencia de este efecto no se aprecia prácticamente cuando se trabaja en condiciones normales, pero cuando dicho efecto se une a la corrosión y/o al efecto de la temperatura se vuelve determinante.

Cuanto menor sea la frecuencia cíclica y mayor sea la temperatura de trabajo, menor será la resistencia a la fatiga del material, y por tanto menor tiempo de vida de la pieza.

1.5.6 Factor de concentración de tensiones (K_f)

Este factor se centra en la influencia de elementos concentradores de tensión como pueden ser los chaveteros, las ranuras, los cambios bruscos de sección...

Para calcular el valor del factor de concentración de tensiones ' K_f ' se deben realizar los siguientes pasos:

1. Determinar el factor de concentraciones teórico ' K_t ' en función de la geometría, las dimensiones y los esfuerzos de la pieza ayudándonos de las gráficas adjuntas en el anexo B.

2. Determinar el factor de sensibilidad a las ranuras ' q ' dependiendo del material y de los esfuerzos a los que esté sometida la pieza, utilizando las siguientes figuras:

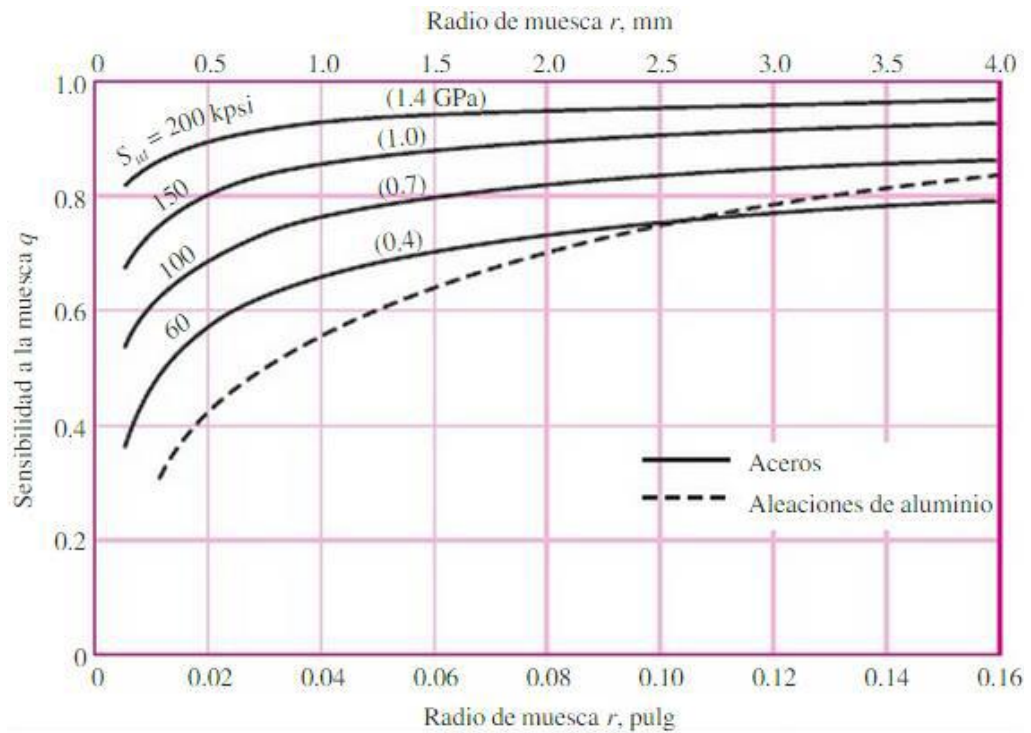


Figura 10. Sensibilidad a las ranuras para cargas de flexión y tensión alternantes

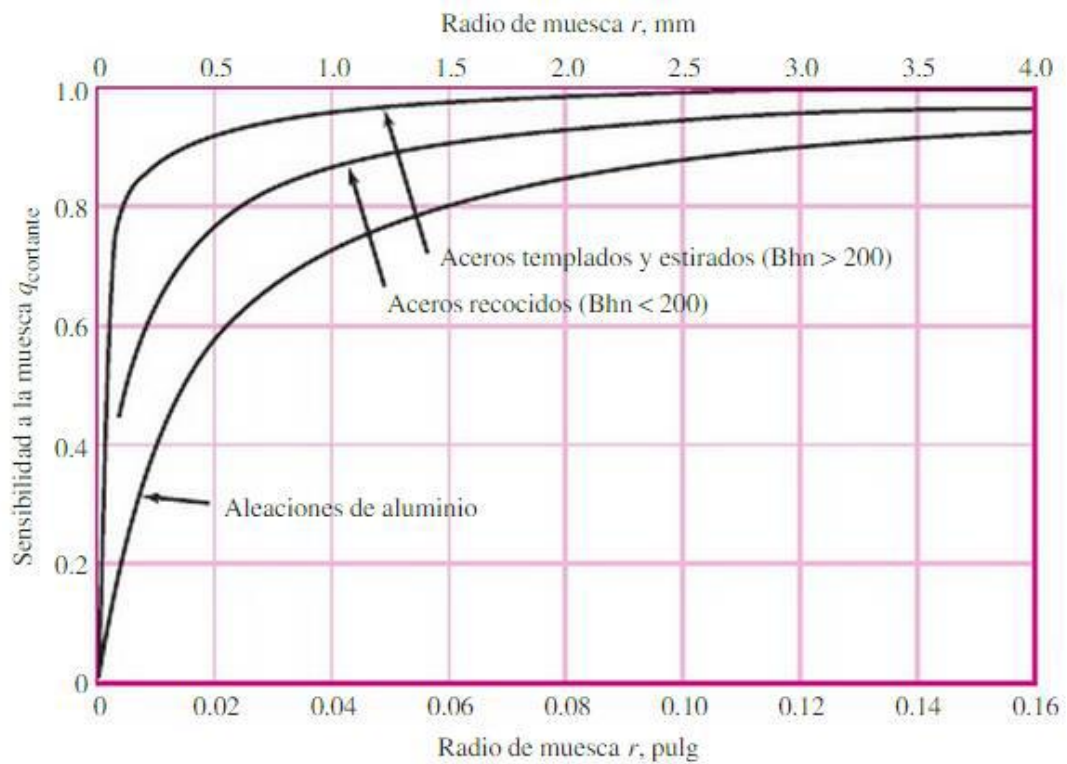


Figura 11. Sensibilidad a las ranuras para cargas de torsión alternantes



3. Calculamos el factor de reducción de resistencia a la fatiga ' R_f ' con ayuda de la siguiente ecuación y los valores obtenidos anteriormente:

$$R_f = q \cdot (K_t - 1) + 1$$

4. Por último, se calcula el factor de concentración de tensiones ' K_f ' como la inversa del factor de reducción de resistencia a la fatiga ' R_f '.

$$K_f = 1/R_f$$

1.6 Caracterización de esfuerzos fluctuantes

Este tipo de esfuerzo se caracteriza por su forma sinusoidal o por tener otro tipo de patrón periódico donde se puede observar que solo existe un máximo y un mínimo en los valores de la fuerza. De esta manera, conociendo estos valores límites, se puede determinar la componente de fuerza de intervalo medio como:

$$F_m = \frac{F_{max} + F_{min}}{2}$$

Fm: Componente de intervalo medio de fuerza.

$$F_a = \left| \frac{F_{max} - F_{min}}{2} \right|$$

Fa: Componente de la amplitud de la fuerza.

En las siguientes gráficas se pueden apreciar varios tipos de las relaciones que existen entre el esfuerzo y el tiempo:

- a) Esfuerzo fluctuante con pulsaciones de alta frecuencia.
- b) Esfuerzo fluctuante no senoidal.
- c) Esfuerzo fluctuante no senoidal.
- d) Esfuerzo fluctuante senoidal.

e) Esfuerzo repetido.

f) Esfuerzo senoidal completamente invertido.

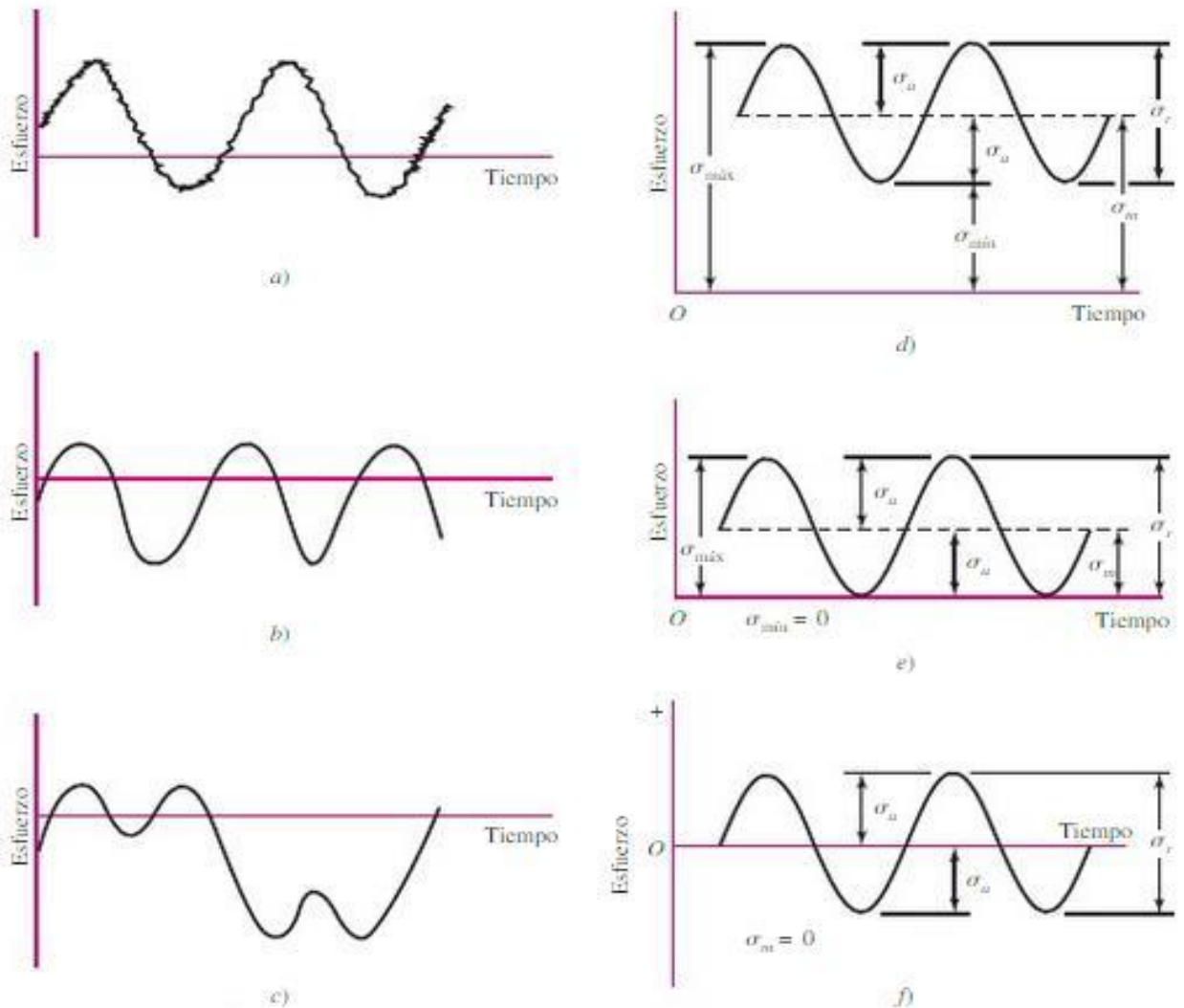


Figura 12. Relaciones esfuerzo-tiempo

Donde:

$\sigma_{\text{máx}}$: esfuerzo máximo.

$\sigma_{\text{mín}}$: esfuerzo mínimo.

σ_r : intervalo de esfuerzo.

σ_s : esfuerzo estático o constante.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}}}{2}$$



σ_m : componente de esfuerzo medio.

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right|$$

σ_a : componente de la amplitud.

1.7 Componentes variables de esfuerzo medio y amplitud

Hasta el momento hemos trabajado con componentes de esfuerzo medio nulo y de amplitud igual al esfuerzo máximo, a partir de este momento las componentes variables de esfuerzo medio y amplitud se tratarán buscando la relación existente entre la duración del elemento y la componente alternante de tensión, conociendo que la tensión media disminuirá los valores de resistencia.

Como ya se ha comentado anteriormente, para estudiar el tiempo de vida a fatiga de un material se puede determinar por medio del ensayo de viga rotativa, pero en el caso de tensión media no nula se debe determinar a través de relaciones empíricas, como pueden ser la de Goodman, la de Soderberg o la de Gerber.

1.7.1. Criterio de Goodman

Este criterio se puede graficar de manera fácil ya que el lugar geométrico de su falla se caracteriza por ser una línea recta.

En función del criterio utilizado, la variación de la resistencia alternante con la tensión media se describe mediante una recta que pase por los puntos (S_{ut} , 0) y (0, S_e). Por lo tanto, el valor del esfuerzo alternante para N ciclos a rotura es S_e , y el valor para carga alternante nula del esfuerzo medio para que se produzca fallo es S_{ut} .

Por lo tanto, la rotura para N número de ciclos se dará cuando:

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1$$

Donde:

S_a : Resistencia alternante (debida al valor de amplitud de tensión)

S_m : Resistencia media (debida al valor de tensión media)



S_e : Límite de fatiga corregido

S_{ut} : Resistencia a rotura en tracción

1.7.2. Criterio de Soderberg

Este criterio es el más conservador de los tres que vamos a estudiar, y al igual que el anterior, se caracteriza por ser una línea recta, donde el valor que toma el esfuerzo alternante cuando no hay tensión media es S_e , mientras que el valor de esfuerzo medio para ausencia de esfuerzo alternante, siempre y cuando el material sea dúctil, alcanza el valor de S_{yt} .

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{yt}} = 1$$

Donde:

S_a : Resistencia alternante (debida al valor de amplitud de tensión)

S_e : Límite de fatiga corregido

S_m : Resistencia media (debida al valor de tensión media)

S_{yt} : Resistencia a fluencia en tracción (debido al carácter dúctil del material)

1.7.3. Criterio de Gerber

En este caso, la relación que existe está descrita por una parábola que tiene la siguiente forma:

$$\frac{S_a}{S_e} + \left(\frac{S_m}{S_{ut}} \right)^2 = 1$$

Donde:

S_a : Resistencia alternante (debida al valor de amplitud de tensión)

S_e : Límite de fatiga corregido

S_m : Resistencia media (debida al valor de tensión media)

S_{ut} : Resistencia a rotura en tracción.

1.7.4. Comparación criterios de falla

A continuación, se pueden ver los tres criterios superpuestos sobre la misma gráfica para poder apreciar claramente las diferencias que existen entre ellos:

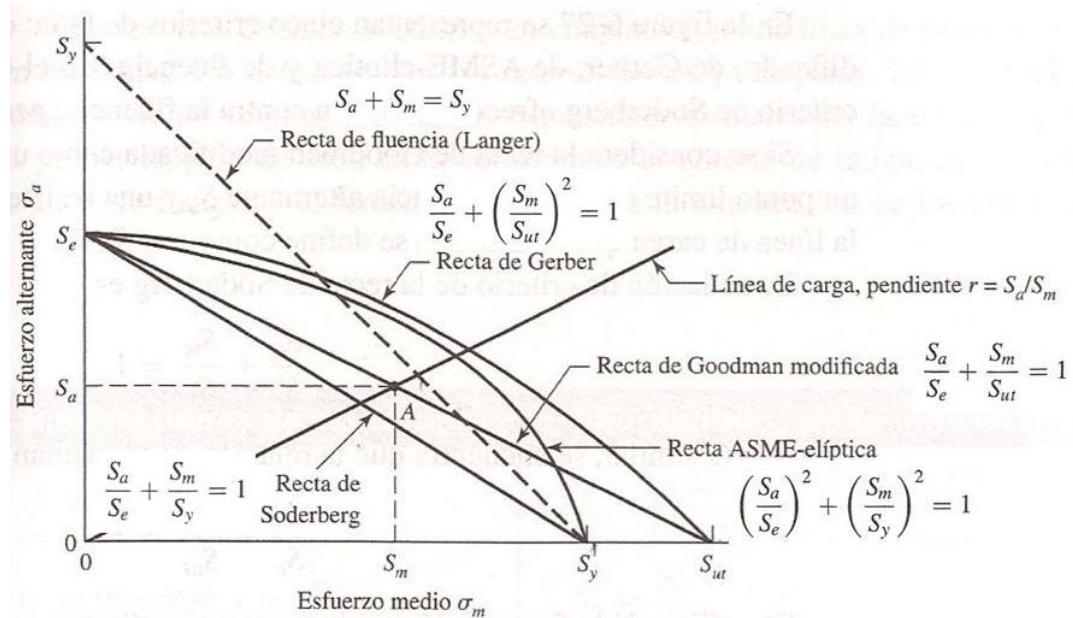


Figura 13. Comparación criterios de falla

Las zonas que se encuentran por debajo de las líneas de falla, representan los puntos donde el material no se ha roto para esos valores de esfuerzos, mientras que los puntos que están por encima de las líneas donde los esfuerzos ya son mayores, el fallo se producirá para un número menor de ciclos.

Si añadimos la recta de fluencia (Langer) al razonamiento, vemos que el criterio de Soderberg es el único que previene contra fluencia, por lo que se puede afirmar que según este criterio la tensión máxima no va a superar el valor de resistencia a la fluencia del material. Dicha afirmación no es válida en el caso de Goodman y de Gerber, ya que según estos criterios, el material puede romper antes por fluencia que por fatiga.





CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA



2 Planteamiento del problema

Para llevar a cabo la resolución del problema se va a recurrir a un proceso de iteración, a través del cual, vamos a poder calcular la profundidad que tendrá la grieta justo en el instante anterior a que su crecimiento sea inestable y se genere la ruptura repentina del eje.

El proceso consta de los siguientes pasos:

1. Cálculo de la profundidad en la que se supera el valor de tenacidad a fractura del material, es decir, cuando el valor del factor de intensidad de tensiones supere los $73 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. De esta manera podemos conocer la profundidad a partir de la cual, se produce la propagación de la grieta.

Para la obtención de este dato, se necesitan los valores de los factores de intensidad de tensiones calculados alrededor de la grieta, en concreto necesitamos los valores máximos, para que de esta manera, estemos trabajando siempre con el punto más crítico de la pieza.

		ÁNGULO (°)					
		30	60	90	120	150	180
PROFUNDIDAD (mm)	14,94	52,4	47,1	20,7	38,9	51,2	54,8
	22,5	57,4	47,8	40	46,3	58,3	60
	29,88	76,9	57,7	38,8	55,6	67,9	67
	39,87	83,4	67,9	42,7	68,1	81,5	73,8
	49,95	93,2	83,3	63,6	81,7	92,1	85
	59,95	105	99,9	83,5	103	106	96,9
	74,97	136	114	91,3	187	156	123

Tabla 4. Valores FIT ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) para distintas profundidades a lo largo de un ciclo

Se puede apreciar que los valores donde se alcanza primero el valor de la tenacidad a fractura, es el momento en el que la grieta se encuentra en la posición de 30° . Por lo que podemos graficar

estos valores en dicha posición angular y así poder calcular la profundidad con la que iniciaremos el estudio.

En la siguiente gráfica, se recogen los datos del factor de intensidad de tensiones para cada profundidad de la grieta en la posición angular de 30°:

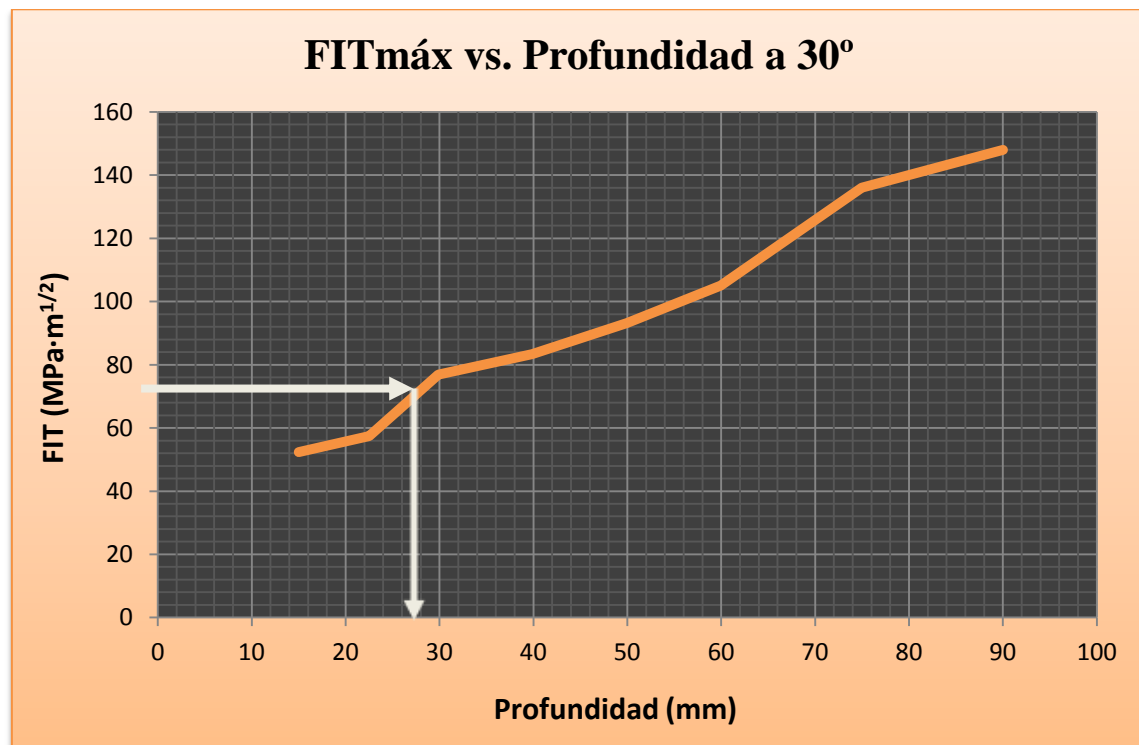


Figura 14. Valores Factor Intensidad de Tensiones frente a la profundidad en la posición angular de 30°

De esta manera, si entramos a la gráfica con un valor del factor de intensidad de tensiones de $73 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, obtenemos un valor de 28 mm de profundidad, que será el valor con el que iniciaremos el estudio.

2. El siguiente paso consiste en estudiar el efecto de la profundidad de la grieta, a lo largo de un ciclo o vuelta del eje, sobre los valores del factor de intensidad de tensiones. En concreto, nos vamos a fijar en los valores máximos y mínimos, para poder calcular la variación que existe en cada instante ' ΔK '; dato que posteriormente utilizaremos en la Ley de Paris.

Recogemos estos datos en la siguiente tabla:

		ÁNGULO (°)					
		30	60	90	120	150	180
PROFUNDIDAD (mm)	22,5	38,4	49,52	69,9	49,1	38,8	17,4
	29,88	58	64,32	74,2	60,36	43,1	13,9
	39,87	58,3	80	85,7	80,3	54,2	16,7
	49,95	65,7	100,1	124	91,61	57,4	24,4

Tabla 5. Valores ΔK ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) para distintas profundidades a lo largo de un ciclo

Si comparamos los valores del FIT a lo largo de una vuelta, es decir, para cada posición angular, vemos que la máxima variación ' ΔK ' para cada profundidad de la grieta se produce en la posición de 90° .

Como ya hemos localizado la situación de la grieta donde las variaciones del FIT son máximas, necesitamos realizar una regresión a dichos datos, lo más precisa posible, para utilizar la línea de tendencia que siguen los datos en el proceso de iteración. A continuación, se puede ver la gráfica con la ecuación exponencial de grado 3 calculada:

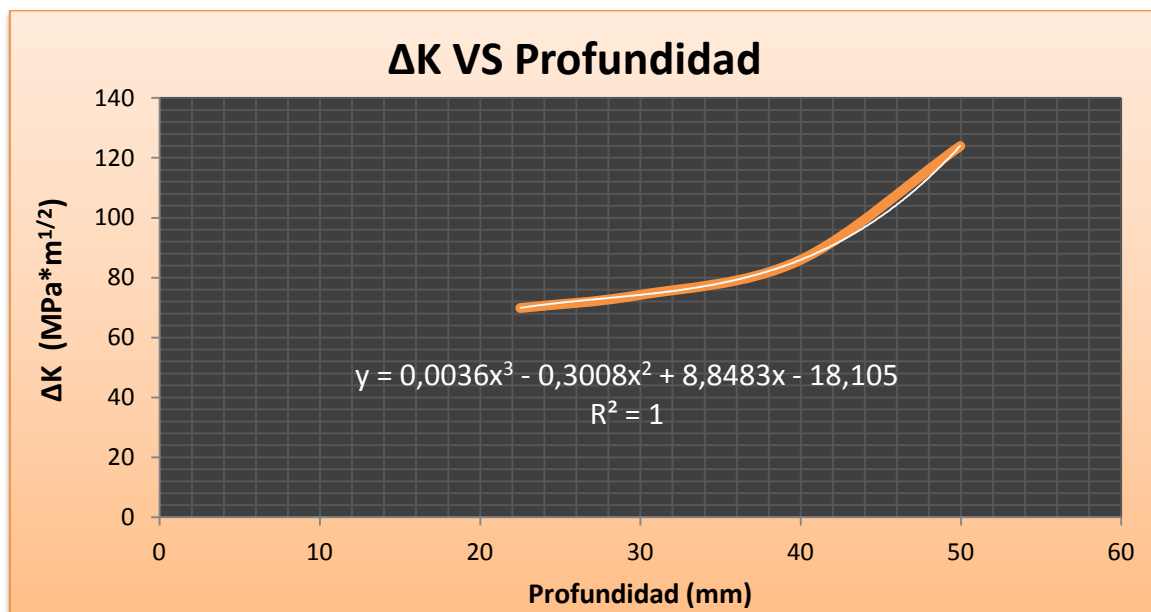


Figura 15. Gráfico ΔK vs. profundidad

Esta línea de tendencia es la que utilizaremos en la iteración para calcular las variaciones del factor de intensidad de tensiones ' ΔK ' en función de la profundidad de la grieta.

3. El tercer paso del proceso se realiza en paralelo con el anterior, ya que vamos a calcular los valores de la tensión de Von Mises que soporta el eje en función de la profundidad de la grieta. Para ello trabajamos de la misma manera que en el anterior paso, es decir, estudiando los datos para cada profundidad y para cada posición angular.

En la siguiente tabla mostramos dichos valores de la tensión máxima de Von Mises:

PROFUNDIDAD (mm)	ÁNGULO (°)						
	0	30	60	90	120	150	180
7,47	59,49	46,15	41,56	37,8	45,36	69,15	56,63
14,94	65,2	51,56	52,64	37,96	48,83	76,5	61,67
22,5	67,05	56,08	57,95	38,3	57,94	81,67	63,26
29,88	80,1	67,77	73,78	40,03	66,3	89,6	68,97
39,87	86,64	69,3	83,89	47,38	131,2	89,81	72,45
49,95	94,65	71,6	151,6	60,19	216,4	91,3	78,09
59,85	123,6	84,05	238,6	69,49	335,5	93	99,13

Tabla 6. Tensiones máximas de Von Mises (MPa) en función de la profundidad y de la posición angular.

Como ya hemos hecho en el anterior paso, estudiamos los datos de tensión para cada profundidad de la grieta, y utilizamos el valor de la posición angular donde la tensión sea máxima. De esta manera siempre trabajamos sobre el punto más exigido a nivel tensional, lo que nos permite asegurar que estudiamos el punto más crítico del eje.

En este caso, vemos que la máxima tensión se produce en la posición correspondiente a 150° cuando la grieta aún no ha alcanzado los 30 mm, y a partir de esta profundidad los valores máximos se dan en la posición de 120°.

Si graficamos dichos valores máximos y calculamos la línea de tendencia que siguen los datos, obtenemos lo siguiente:

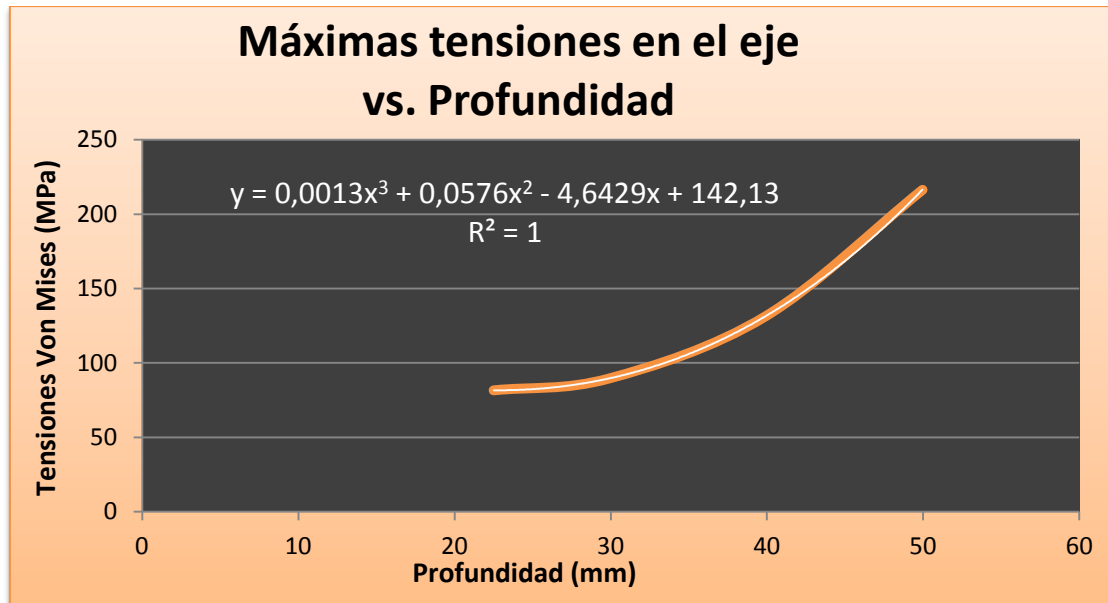


Figura 16. Gráfico máximas tensiones Von Mises vs. Profundidad grieta

Con esta ecuación podremos calcular la tensión máxima de Von Mises en función de la profundidad de la grieta.

4. El siguiente paso consiste en utilizar la tensión de Von Mises calculada en el paso anterior, para poder hallar el número de ciclos que soporta el eje antes de romperse. Para ello vamos a trabajar con el gráfico S-N (Stress-Number of cycles).

Primero necesitamos calcular los coeficientes modificativos del límite de fatiga, siguiendo los pasos de teoría de la sección 1.5, para terminar obteniendo el límite de fatiga corregido.

I. Factor de acabado superficial (K_a)

El eje estudiado está laminado en frío, en la tabla 2 obtenemos los coeficientes necesarios para calcular dicho factor:

$$K_a = a \cdot S_{ut}^b = 4,51 \cdot 690^{(-0,265)} = 0,7977$$

II. Factor de tamaño (K_b)

Como el eje está sometido a flexión y el diámetro del eje en la sección donde está la grieta es 187 mm, la ecuación utilizada es:

$$K_b = 1,189 \cdot d^{-0,097} = 1,189 \cdot 187^{-0,097} = 0,7158$$

III. Factor de confiabilidad (K_c)

En este problema, las soluciones se van a calcular para un nivel de confiabilidad del 95%:

$$K_c(95\%) = 0,868$$

IV. Factor de temperatura (K_d)

El eje va a trabajar a temperatura ambiente, por lo que este factor será:

$$K_d = 1$$

V. Factor de concentración de tensiones (K_f)

La grieta está situada sobre un cambio de sección, por lo que este factor va a ser muy influyente. Primero, se necesita calcular el factor de concentración teórico ' K_t ', utilizando los datos de las dimensiones del eje en la siguiente figura:

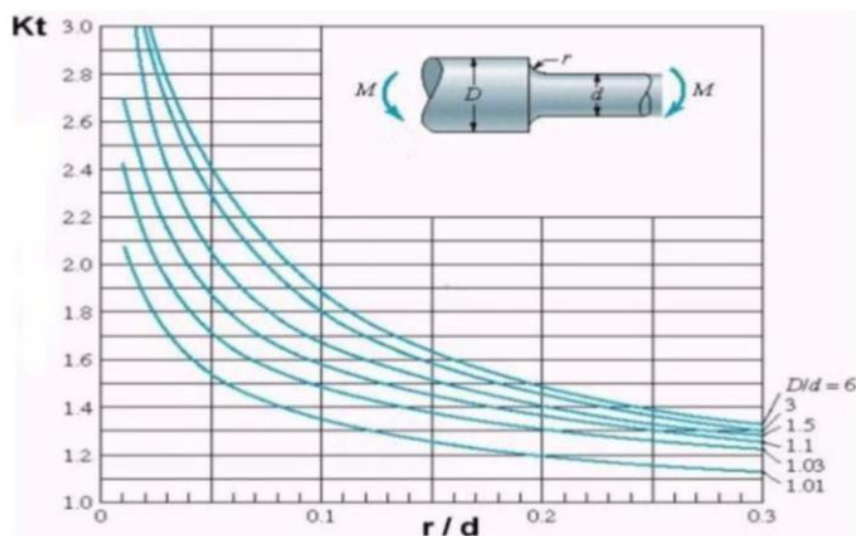


Figura 17. Barra de sección circular con estrechamiento y entalles sometida a flexión

$$\left. \begin{aligned} r/d &= \frac{40}{159,5} = 0,25 \\ D/d &= \frac{214}{159,5} = 1,34 \end{aligned} \right\} K_t = 1,3$$

El siguiente paso consiste en calcular el factor de sensibilidad a las ranuras 'q', utilizando la gráfica siguiente, el radio de las ranuras y el valor de la tensión última a tracción:

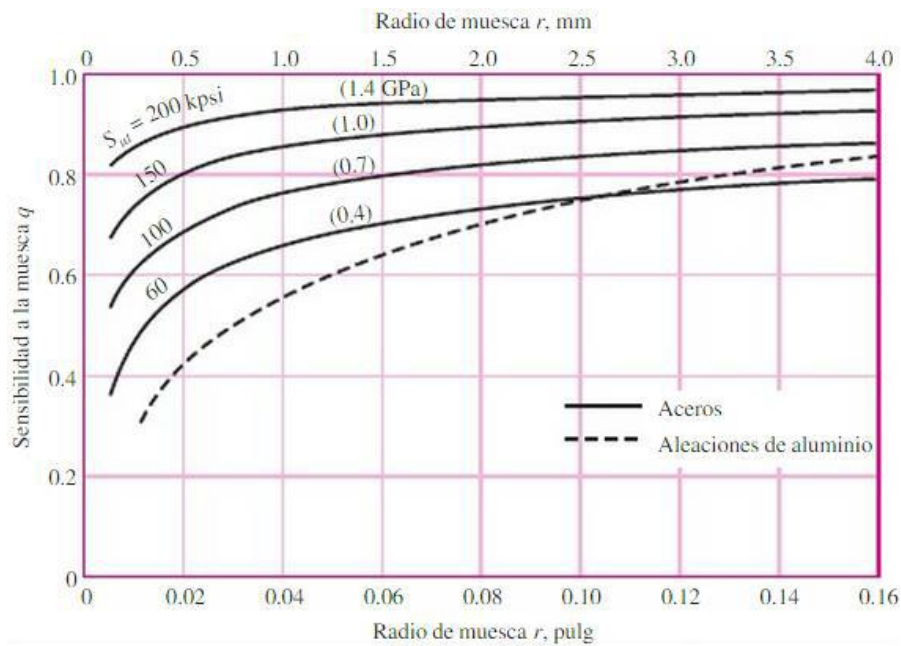


Figura 18. Sensibilidad a las ranuras para cargas de flexión y tensión alternantes

$$\left. \begin{aligned} S_{ut} &= 690 \text{ MPa} \\ r &= 3 \text{ mm} \end{aligned} \right\} q = 0,8$$

Con los dos datos calculados, vamos a hallar el valor factor de reducción de resistencia a la fatiga 'R_f' por medio de la siguiente ecuación:

$$R_f = q \cdot (K_t - 1) + 1 = 0,8 \cdot (1,3 - 1) + 1 = 1,24$$

Por último, se calcula el factor de concentración de tensiones ' K_f ' de la siguiente manera:

$$K_f = \frac{1}{R_f} = 0,8064$$

Una vez calculados todos los coeficientes modificativos, podemos calcular el valor del límite de fatiga corregido ' S_e ' para dibujar la gráfica S-N, utilizando la siguiente expresión:

$$S_e = 0,5 \cdot S_{ut} = 345 \text{ MPa}$$
$$S_e = \prod_i K_i \cdot S'_e = 137,88 \text{ MPa}$$

Por lo tanto, la gráfica S-N teniendo en cuenta la corrección de la ecuación de Marin, con los coeficientes modificativos, queda de la siguiente manera:

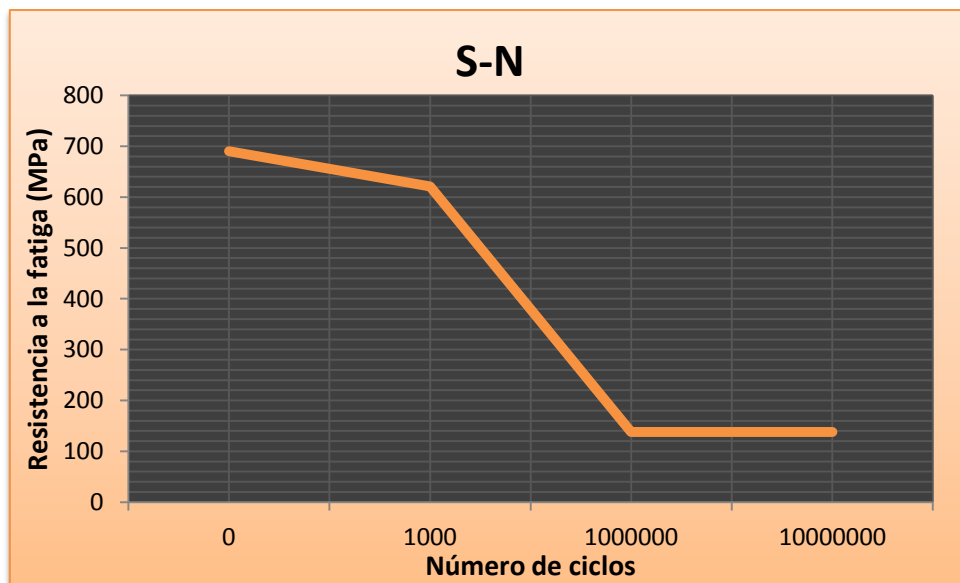


Figura 19. Gráfica S-N (Stress-Number of cycles)

Con la gráfica dibujada, vamos a poder calcular el número de ciclos que soporta el eje antes de romperse, en función de la tensión máxima de Von Mises.

De esta manera, si la profundidad de la grieta que estemos estudiando, no genera una tensión de Von Mises superior al límite de fatiga corregido que hemos calculado (137,88 MPa), la pieza tendrá una vida infinita. Pero cuando la tensión supere dicho

límite, el numero de ciclos empezará a disminuir y dependerá de la relación lineal del tramo intermedio de la gráfica, y por tanto, la vida a fatiga del eje estará en torno al millón de ciclos.

5. El quinto paso consiste en juntar las dos ramas de la iteración con la que estamos trabajando, de tal forma que utilizando los valores de las máximas variaciones del factor de intensidad de tensiones ' ΔK ' y el número de ciclos que soporta el eje antes de romperse, podamos evaluar, en qué instante del crecimiento de la grieta nos encontramos.

Para realizar esta valoración necesitamos la gráfica de la 'Ley de Paris' del material, que tiene la siguiente forma:

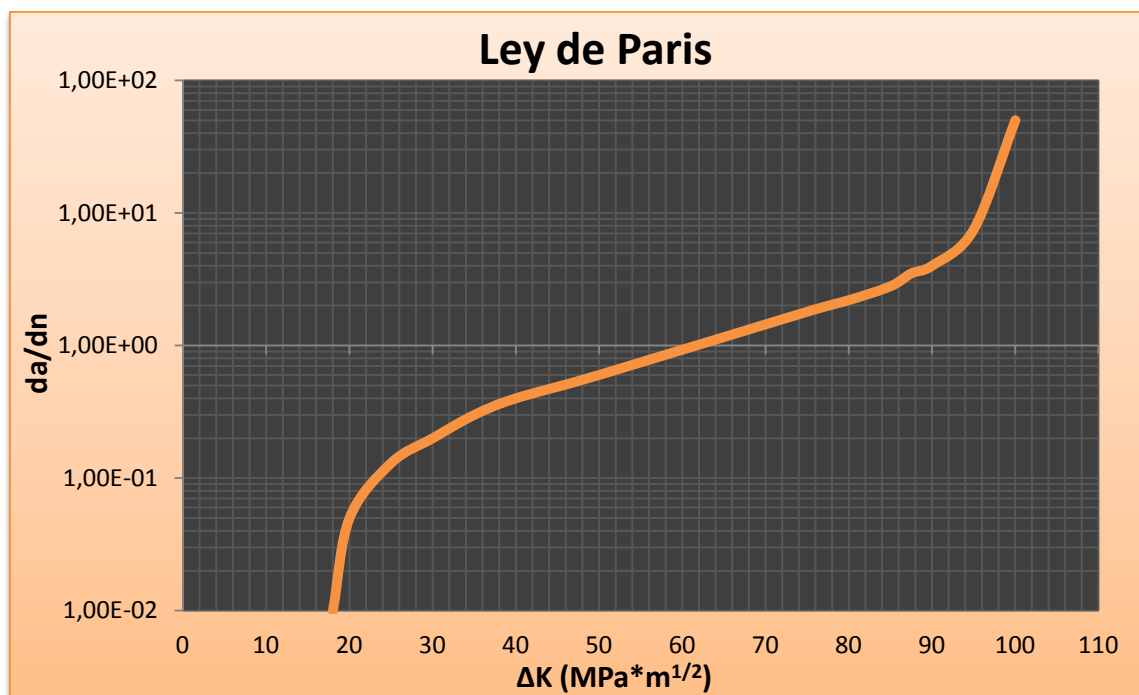


Figura 20. Ley de Paris

Como ya se explicó en la teoría, dicha ley está definida por tres zonas bien diferenciadas. Nosotros vamos a estudiar la zona intermedia, donde el crecimiento que experimenta la grieta es lineal.

Para poder determinar el límite a partir del cual el crecimiento de la grieta se hace insostenible, necesitamos cortar la gráfica y trabajar solo con la zona central. Con la idea de confirmar la linealidad de dichos datos y conocer así el valor máximo que puede alcanzar el ' ΔK ' antes de producirse el cambio brusco de pendiente en la gráfica, provocando la rotura inmediata del eje.

La selección de los datos en la zona de crecimiento estable y la tendencia lineal de los mismos se muestra en las siguientes figuras:

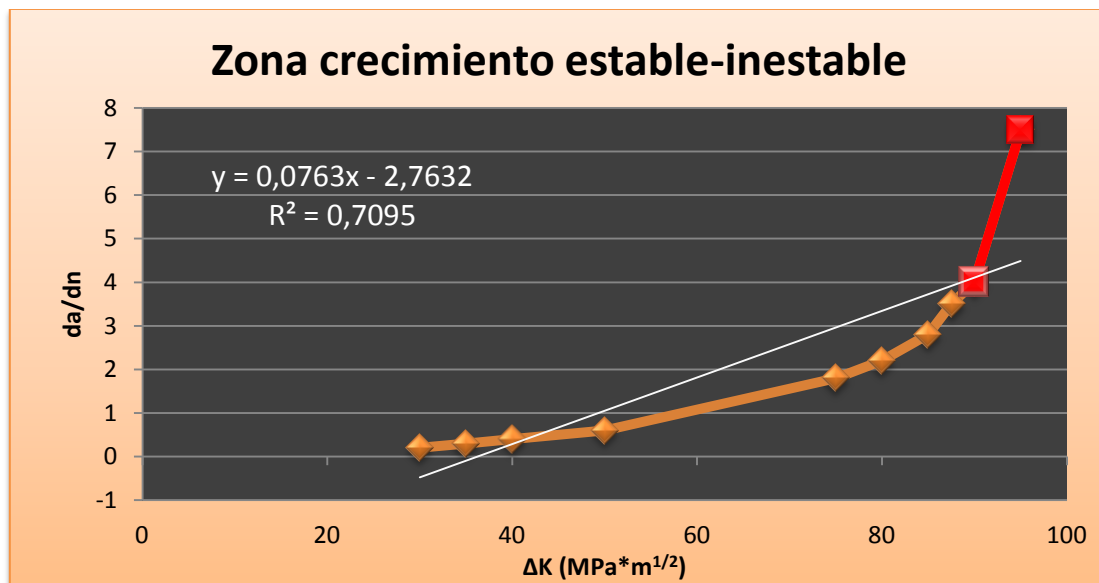


Figura 21. Zona de crecimiento estable-inestable de la 'Ley de Paris'

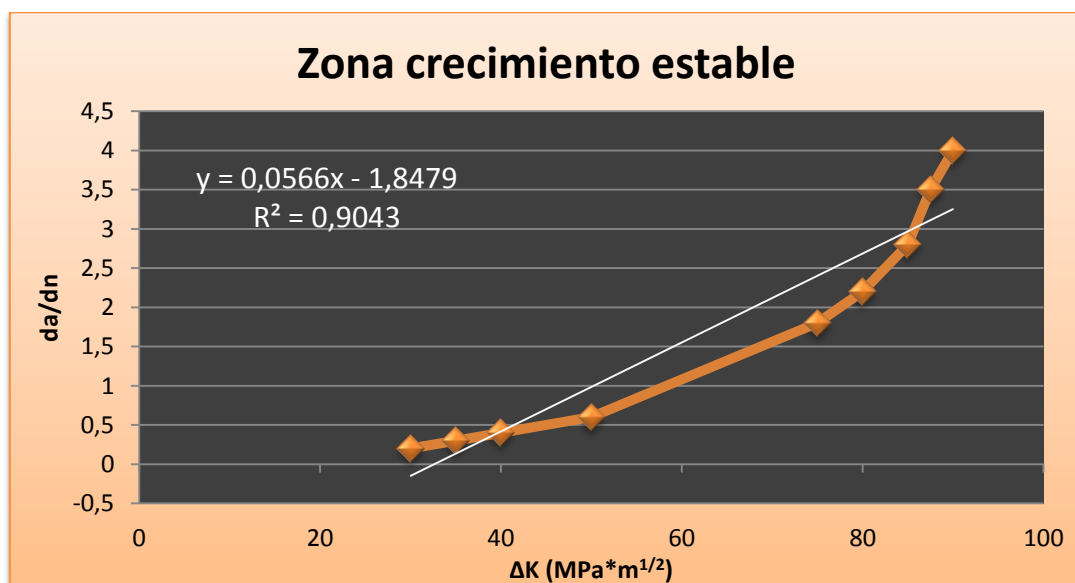


Figura 22. Zona de crecimiento estable de la 'Ley de Paris'



De esta manera, se corrobora la tendencia lineal de la zona intermedia de la 'Ley de Paris', cuyo límite superior, como se aprecia en la gráfica recortada, está en los $90 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. Este valor nos servirá para poner fin al proceso de iteración con el que estamos trabajando. De manera que cuando se llegue a este valor, daremos por finalizado el proceso y recogeremos los resultados calculados en la última iteración.

La regresión lineal realizada sobre la anterior gráfica, ha servido únicamente para demostrar la tendencia lineal que siguen los datos, no se ha utilizado como sustitución de la recta real de la 'Ley de Paris'. Dado que el uso de los datos obtenidos en la regresión lineal, podría provocar un determinado error para el cálculo del número de ciclos que soporta el eje antes de romperse.

El proceso con el que se va a trabajar, explicado paso a paso anteriormente, queda resumido en el siguiente diagrama de flujo:

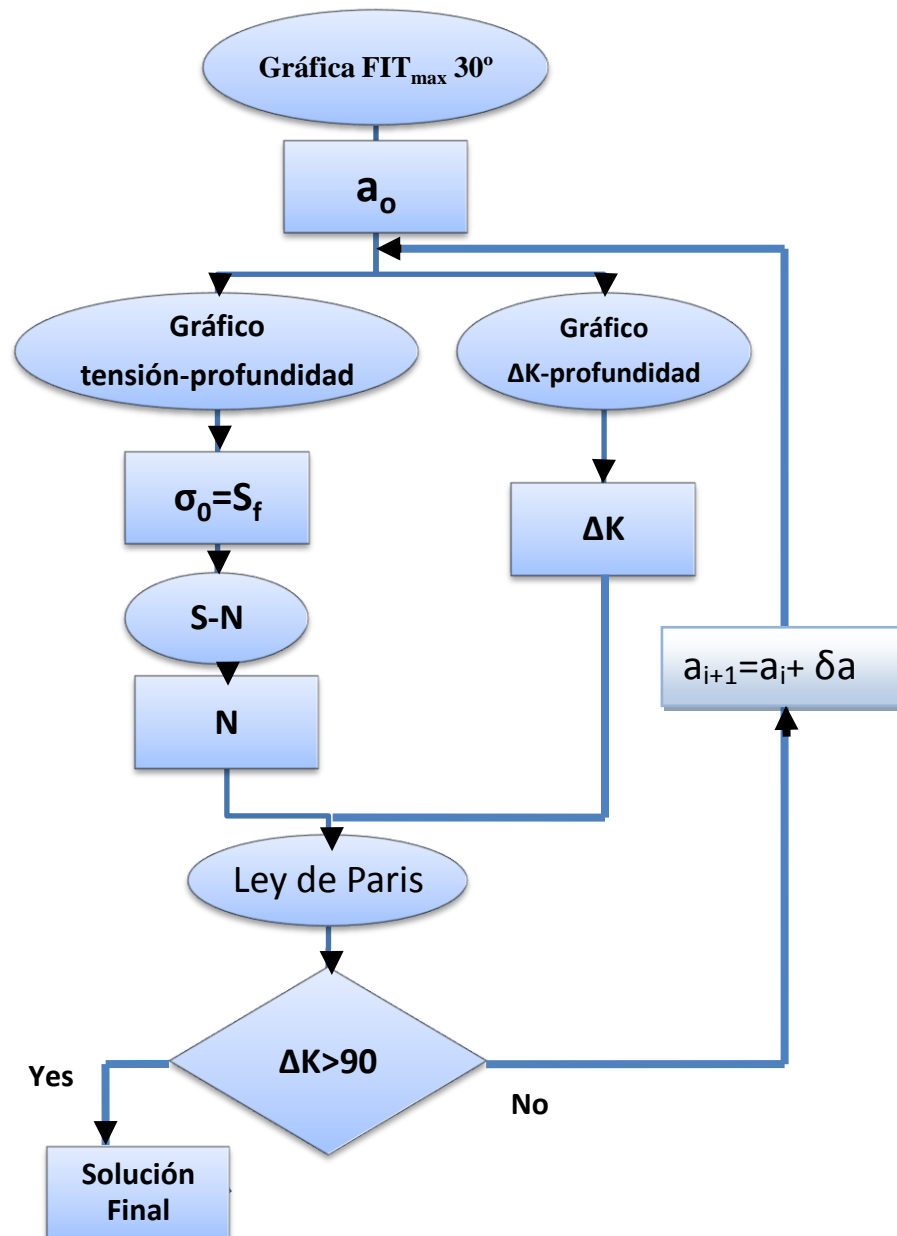


Figura 23. Diagrama de flujo para el cálculo del crecimiento de grietas



Como resumen a lo expuesto en este capítulo se destaca lo siguiente:

1. Se ha obtenido la profundidad con la que se inicia la propagación de la grieta, que nos sirve para dar comienzo al estudio. Para ello se han utilizado los valores del Factor de Intensidad de Tensiones alrededor de la grieta.
2. Se ha analizado la tendencia de las máximas variaciones del FIT (ΔK) en función de la profundidad.
3. A continuación, se lleva a cabo el mismo estudio con la tendencia de las tensiones de Von Mises.
4. En este paso se determina el número máximo de ciclos que soporta el eje antes de que el crecimiento de la grieta sea insostenible. Para ello se ha necesitado calcular el valor del límite de fatiga corregido ' S_e ' y todos los factores modificativos de la ecuación de Marin.
5. Finalmente, se ha utilizado la Ley de Paris para determinar el valor máximo de la variación del FIT (ΔK), a partir del cual el crecimiento es incontrolable. Este valor nos servirá para finalizar el proceso iterativo, obteniendo así los resultados del problema planteado inicialmente.





CAPÍTULO III

RESULTADOS



Índice

3.1	Programación Matlab.....	59
3.2	Resultados obtenidos de Matlab.....	60
3.3	Conversión de los resultados.....	61
3.4	Influencia de la velocidad en los resultados.....	62
3.4.1	Itinerario 1	62
3.4.2	Itinerario 2	63



3 Resultados

3.1 Programación Matlab

Para la obtención de los resultados del problema, se va a trabajar con el programa 'Matlab', el cual nos va a permitir calcular las soluciones del problema de una manera rápida y sencilla, dejando modificar los parámetros de cálculo que han sido impuestos en la primera hipótesis, si así fuese necesario. Además facilita muchísimo el cálculo en futuras variaciones del problema.

A continuación, se puede ver el código del programa definido a través del programa 'Matlab', utilizando las ecuaciones y los valores obtenidos en el planteamiento del problema:

```
function Codigo_trabajo()

close all
clc
clear

%Profundidad cuando FIT=73MPa*m1/2
a=28; %[mm]
fit=0;
maxfit=90;

%%%%%%%%%
% Metodo: usando fzero
% fzero busca el valor de x para el cual la funcion que se le pasa
% como argumento vale 0

% La funcion es f(a) = fit - maxfit

% fit es dependiente de 'a', maxfit es el objetivo

% Se alcanza el valor de 'a' buscado cuando fit = maxfit => f(a)=0

% Hay que especificar el valor mínimo de 'a' y el máximo. fzero busca entre
% estos valores

% Recalcular "a" mediante fzero. Funcion de cálculo:
fun_a_obj = @(a_val) obtener_a_obj(a_val,maxfit);

% Valor minimo y valor maximo de "a"
a0 = [28, 90];
```



```
% Obtener resultado
a=fzero(fun_a_obj,a0);

fprintf('\nResultados\n\ta = %.6f\n\tN = %.6f\n',a,N)
fprintf('\tf\tfit = %.6f\n\terror = %.6f\n\ttension = %.6f\n',fit,fit-maxfit,tension);

function res = obtener_a_obj(a_val,maxfit)

%Calculamos tension de Von Mises para cada profundidad
tension=0.0013*(a_val^3)+0.0576*(a_val^2)-4.6429*a_val+142.13; %[MPa]

%Calculamos variacion FIT para cada profundidad
fit=0.0036*(a_val^3)-0.3008*(a_val^2)+8.8483*a_val-18.105; %[MPa*m1/2]

%Calculamos el número de ciclos en el diagrama S-N
if(tension<137.88) %límite de fatiga corregido
    n=12; %vida infinita
end

if(tension>137.88)
    n=15.82-(log10(tension)/0.2178634);
end

N=10^n; %número de ciclos

res=fit-maxfit;
end

end
```

3.2 Resultados obtenidos de Matlab

Con esta función que hemos programado obtenemos las soluciones rápidamente. Los resultados del problema que hemos planteado, en el cual buscamos el instante donde el crecimiento de la grieta se hace insostenible son:

- Profundidad de la grieta: 42,139728 mm
- Tensión a la que se produce: 146,041918 MPa
- Número de ciclos: 767323,782543 ciclos

Gracias al análisis de esfuerzos y al estudio de vida a fatiga al que hemos sometido al eje, hemos podido determinar la vida de un eje no sano, es decir, llegar a calcular el número de ciclos que tarda en romperse un eje desde que



aparece una grieta en su superficie hasta que su crecimiento se vuelve incontrolable, con la consiguiente ruptura del eje.

3.3 Conversión de los resultados

Para entender mejor los resultados, vamos a convertir el número de ciclos a una unidad más útil y cómoda.

Para realizar esta conversión, vamos a trabajar con parámetros específicos de los trenes en los que se montan estos ejes que hemos estudiado.

- Frecuencia: Para calcular la frecuencia a la que trabaja el eje, utilizamos valores típicos de velocidad y diámetro de rueda de un tren de mercancías.

$$v = 100 \frac{km}{h} = 27,78 \frac{m}{s}$$

$$D = 920 \text{ mm} = 0,92 \text{ m}$$

Utilizamos estos valores para calcular la velocidad angular, y con ella despejar el valor de la frecuencia:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{27,78}{0,46} = 60,38 \frac{rad}{s}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{60,38}{2\pi} = 9,61 \text{ s}^{-1}$$

- Días: tomando como referencia que el tren está 12 horas en funcionamiento cada día:

$$N_{días} = \frac{N_{ciclos}}{f} \cdot \frac{1}{3600} \cdot \frac{1}{12} = \frac{767323,78}{9,61} \cdot \frac{1}{3600} \cdot \frac{1}{12} = 1,85 \text{ días}$$

Por lo tanto, ya conocemos el tiempo que tarda, en días, en romperse el eje de un tren desde que aparece la grieta en su superficie.



3.4 Influencia de la velocidad en los resultados

Para refinar los resultados y obtener una solución que se aproxime más a la realidad, se va a calcular el tiempo que tarda en propagarse la grieta teniendo en cuenta el efecto de la velocidad.

3.4.1 Itinerario 1

Los datos que se muestran a continuación son los referentes al perfil de velocidades de un tren de alta velocidad en el itinerario 1.

- Durante el 70% del tiempo va a 300 Km/h
- Durante el 10% del tiempo va a 250 Km/h
- Durante el 10% del tiempo va a 120 Km/h
- Durante el 6% del tiempo va a 225 Km/h
- Durante el 4% del tiempo va a 150 Km/h

Por lo que, si calculamos la velocidad media del tren para estudiar su influencia:

$$v = 0,7 \cdot 300 + 0,1 \cdot 250 + 0,1 \cdot 120 + 0,06 \cdot 225 + 0,04 \cdot 150$$

$$v = 266,5 \text{ Km/h} = 74,02 \text{ m/s}$$

$$w = \frac{v}{r} = \frac{74,02}{0,46} = 160,91 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$f = \frac{w}{2\pi} = \frac{160,91}{2\pi} = 25,61 \text{ s}^{-1}$$

De esta manera, al tener en cuenta el efecto de la velocidad del tren en la vida a fatiga del eje fracturado, los resultados son:

$$N_{días} = \frac{N_{ciclos}}{f} \cdot \frac{1}{3600} = \frac{767323,78}{25,61} \cdot \frac{1}{3600} = 8,32 \text{ horas}$$



3.4.2 Itinerario 2

Si realizamos el mismo estudio en un recorrido distinto con otro perfil de velocidades como el siguiente:

- Durante el 40% del tiempo va a 275 Km/h
- Durante el 40% del tiempo va a 250 Km/h
- Durante el 10% del tiempo va a 150 Km/h
- Durante el 10% del tiempo va a 125 Km/h

Si se calcula la velocidad media del tren según su perfil de velocidades, obtenemos:

$$v = 0,4 \cdot 275 + 0,4 \cdot 250 + 0,1 \cdot 150 + 0,1 \cdot 125$$

$$v = 237,5 \text{ Km/h} = 65,97 \text{ m/s}$$

$$w = \frac{v}{r} = \frac{65,97}{0,46} = 143,41 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$f = \frac{w}{2\pi} = \frac{143,41}{2\pi} = 22,82 \text{ s}^{-1}$$

De esta manera, al tener en cuenta la influencia de la velocidad del tren en la vida a fatiga del eje fracturado, los resultados son:

$$N_{\text{días}} = \frac{N_{\text{ciclos}}}{f} \cdot \frac{1}{3600} = \frac{767323,78}{22,82} \cdot \frac{1}{3600} = 9,34 \text{ horas}$$



En la siguiente tabla quedan recogidos los resultados que se han obtenido del estudio de la influencia que tiene la velocidad, en la vida a fatiga de un eje fracturado:

Velocidad Media del tren (Km/h)	Vida a fatiga (horas)
100	22,2
266,5	8,32
237,5	9,34

Tabla 7. Vida a fatiga de un eje fracturado en función de la velocidad media del tren

Como se puede ver, es muy importante tener en cuenta el perfil de velocidades del tren para el cálculo de la vida a fatiga ya que, este modifica notablemente los resultados obtenidos y nos puede llevar a cometer errores.



CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas son:

- Inexistencia de marco legal actual.
- La necesidad de la creación de una metodología para el cálculo de la vida a fatiga de un eje dañado.
- La posibilidad de mejora de las inspecciones en el ámbito ferroviario.

Estos resultados permitirían a la industria ferroviaria añadir nuevas pautas a sus inspecciones, y a modificar las pautas de las inspecciones, cuando se esté circulando en los días cercanos a la posible aparición de la grieta.

Según el estudio previo realizado por 'Helio Mera Panadero' en su trabajo final de grado sobre este eje, el número de días que tarda en aparecer la grieta en las mismas condiciones de trabajo son 1273 días.

De esta manera, se podría aumentar el nivel de control en trenes cuyo tiempo de funcionamiento se aproxime a esa cifra, para que en el caso de descubrir una grieta en dichas inspecciones, a sabiendas de que el tren podrá estar en funcionamiento unas 22 horas como mucho, en función del tamaño que tenga la grieta en el momento que ha sido detectada, teniendo en cuenta así mismo, la influencia de la velocidad del tren, como ha quedado demostrado de manera notoria, que dicha influencia es determinante para poder calcular el tiempo máximo de uso permitido en un eje cuando aparece la grieta.





FUTUROS TRABAJOS

En este proyecto se ha llevado a cabo un estudio con el fin de entender el comportamiento de una grieta a fatiga situada en la superficie de un eje.

Dicho trabajo continúa con la línea marcada por el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad, que persigue estudiar el comportamiento de los trenes en circulación y ayudar con ello a la industria ferroviaria.

A continuación, se plantean posibles trabajos futuros como:

- Estudio del efecto de la forma de la grieta en los valores de la tensión de Von Mises y del factor de intensidad de tensiones, y con ello el efecto sobre la vida a fatiga de un eje no sano.
- Estudio a fatiga del comportamiento de un eje con diferentes tipos de cargas y diferentes condiciones de trabajo ya sea un tren de alta velocidad o un tren de cercanías.





PRESUPUESTO GENERAL

En este trabajo se ha llevado a cabo gracias al uso de herramientas y de materiales, que aun estando disponibles la gran mayoría en la Universidad, generan unos gastos de uso y de mantenimiento.

A continuación, detallamos las fases del trabajo y las duraciones aproximadas de cada una:

- 1) Definición de los objetivos del Trabajo Fin de Grado: 3 semanas
- 2) Búsqueda de información: 5 semanas
- 3) Modelización y simulación del problema: 5 semanas
- 4) Obtención de datos: 1 semana
- 5) Análisis de los resultados: 2 semanas
- 6) Redacción de la memoria: 5 semanas

Desglose de costes que han intervenido en el proyecto:

1. Personal: Incluye la actividad en el trabajo como Ingeniero Senior, el tutor del proyecto, Juan Carlos García Prada; y como Ingeniero, el autor del trabajo, Juan Carlos Vázquez Olmo.
2. Tecnología: en este apartado se incluyen las licencias de los software *ABAQUS*, *MATLAB* y Office 2007.



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Escuela Politécnica Superior

PRESUPUESTO DEL PROYECTO

1.- Autor:

Juan Carlos Vázquez Olmo

2.- Departamento:

Ingeniería Mecánica

3.- Descripción del proyecto:

Título: Cálculo de la vida a fatiga de un eje ferroviario dañado

Duración (meses): 5,5

4.- Presupuesto Total del Proyecto (€):

16.017,67

5.- Desglose presupuestario (costes directos):

1. Costes de personal

Apellidos y Nombre	Categoría	Dedicación (hombres al mes)	Coste hombre mes	Coste (€)
García Prada, Juan Carlos	Ingeniero Senior	0,5	4289,54	2.144,77
Vázquez Olmo, Juan Carlos	Ingeniero	5	2694,39	13.471,95

Tabla 8. Tabla de costes de personal

Total: 15.616,72€



2. Costes de amortización de la tecnología

Descripción	Coste (€)	% Uso dedicado al proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable
Licencia Abaqus	21950	100	1	60	365,83
Licencia Office 2007	119	100	2	60	3,96
Licencia Matlab	1870	100	1	60	31,16

Tabla 9. Tabla de costes de amortización

Total: 400,95€

² Fórmula de cálculo de la Amortización:

$A/B \times C \times D$ A = nº de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado
 B = periodo de depreciación (60 meses)
 C = coste del equipo (sin IVA)
 D = %del uso que se dedica al proyecto (habitualmente 100%)

³ Este capítulo de gastos incluye todos los gastos no contemplados en los conceptos anteriores, por ejemplo: viajes, dietas, etc.

3. Resumen de costes

Presupuesto Costes Totales	
Personal	15.616,72
Amortización	400,95

Tabla 10. Tabla de resumen de costes

Total: 16.017,67€

El presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de 16.017,67€.

Leganés, 21 de Junio de 2017

Fdo. Juan Carlos Vázquez Olmo





BIBLIOGRAFÍA

1. Páginas Web

- BIGMAC. "Apuntes fatiga en metales".
<http://bigmac.mecaest.etsii.upm.es/~ignacio/resources/MSD/Apuntes/MSDcap10.pdf>
- E. MIGUEL MARCO. "Análisis modal de un eje ferroviario y comparativa con un equivalente unidimensional". Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2012.
https://orffpruebas.uc3m.es/bitstream/handle/10016/16902/TFG_Miguel_Marco_Esteban.pdf?sequence=1
- FCMAD. " Publicaciones Accidentes ferroviarios".
[http://www.fcmaf.es/Publicaciones/Accidentes_Ferrovianos_\(gravedad\).pdf](http://www.fcmaf.es/Publicaciones/Accidentes_Ferrovianos_(gravedad).pdf)
- H. MERA PANADERO. "Metodología para el análisis de esfuerzos y la fatiga de ejes y obtención del factor de intensidad de tensiones mediante el método XFEM en ABAQUS". Proyecto fin de Carrera. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid. 2014.
- INGEMECÁNICA. "Resistencia Mecánica a Fatiga".
<http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn217.html#seccion33>
- J. C. VÁZQUEZ OLMO. "Eje ferroviario "wheelset": metodología para el cálculo del factor de intensidad de tensiones usando Abaqus II". Proyecto fin de Grado. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid. 2015.
https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23720/TFG_Juan-Carlos_Vazquez_Olmo_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- J. I. LÓPEZ GONZÁLEZ. "Multianálisis de un eje ferroviario mediante el software Pro-Engineer". Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2011.
https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/13100/Memoria%20PFC%20DEFINITIVA_Joselgnacio_Lopez_Gonzalez.pdf
- M. BLANCO MARTÍN. "Simulación y análisis del comportamiento mecánico de un sistema mecánico rotativo: creo" Trabajo fin de Grado. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid. 2015.
- M. D. MOZAHID HOSSAIN. "Modeling of fatigue crack growth with Abaqus".



- M. MIGUEL ALCANIZ. "Modelado y análisis por elementos finitos de un eje ferroviario hueco usando Pro-Engineer". Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2011.
- MONOGRAFÍAS. "Crecimiento de grieta en los materiales".
<http://www.monografias.com/trabajos82/crecimiento-grieta-fatiga-materiales-ingenieria/image002.jpg>
- MONOGRAFÍAS. "Crecimiento de grieta en los materiales".
<http://www.monografias.com/trabajos82/crecimiento-grieta-fatiga-materiales-ingenieria/image014.jpg>
- SLIDE PLAYER. "Espacios de seguridad".
<http://slideplayer.es/10338185/33/images/16/Espacios+de+seguridad.jpg>
- SLIDE PLAYER. "Resistencia a la fatiga".
<http://slideplayer.es/10338185/33/images/10/Resistencia+a+la+Fatiga.jpg>
- SLIDE SHARE. "Diagrama S-N".
<https://image.slidesharecdn.com/5-fatiga-100611172736-phpapp02/95/5-fatiga-7-728.jpg?cb=1276277287>
- SLIDE SHARE. "Fatiga de los materiales".
<https://es.slideshare.net/rodrikobale/fatiga-delosmateriales>
- W. D. CALLISTER JR. Libro "Introducción a la ciencia y a la teoría de los materiales". Ed. REVERTÉ. Barcelona, 2007.
https://books.google.es/books?id=gndPV1tXUC&pg=PA202&lpg=PA202&dq=La+teor%C3%ADa+de+fractura+de+Griffith&source=bl&ots=Dww837KcAm&sig=fH3DIXNBCEGop3nx8IXbyyfmGOM&hl=es&sa=X&ved=0CEkQ6AEwBmoVChMIh6TLo_XuxwIVwbQaCh2GaAFI#v=onepage&q=La%20teor%C3%ADa%20de%20fractura%20de%20Griffith&f=false
- WIKIPEDIA: LA ENCICLOPEDIA LIBRE. "Mecánica de la Fractura".
https://es.wikipedia.org/wiki/Fatiga_de_materiales

2. Documentos escritos

- AVILÉS, RAFAEL., (2005), Análisis de Fatiga en Máquinas, Madrid, España: Paraninfo.
- BROEK, DAVID., (1991), Elementary Engineering Fracture Mechanics, Dordrecht, Países Bajos: Kluwer Academic Publishers.
- DRAPER, JOHN., (1999), Modern Metal Fatigue Analysis, Sheffield, Reino Unido: Safe Technology.



-
- H. KITAGAWA, T. AIHARA JR., Y. KAWAZOE., (1998), Mesoscopic Dynamics of Fracture, Berlin, Germany: Springer.
 - RUNGTA, RAVI. LANDGRAF, RON. STEPHENS RALPH., Material Properties.



ANEXO A. PLANO DEL EJE FERROVIARIO

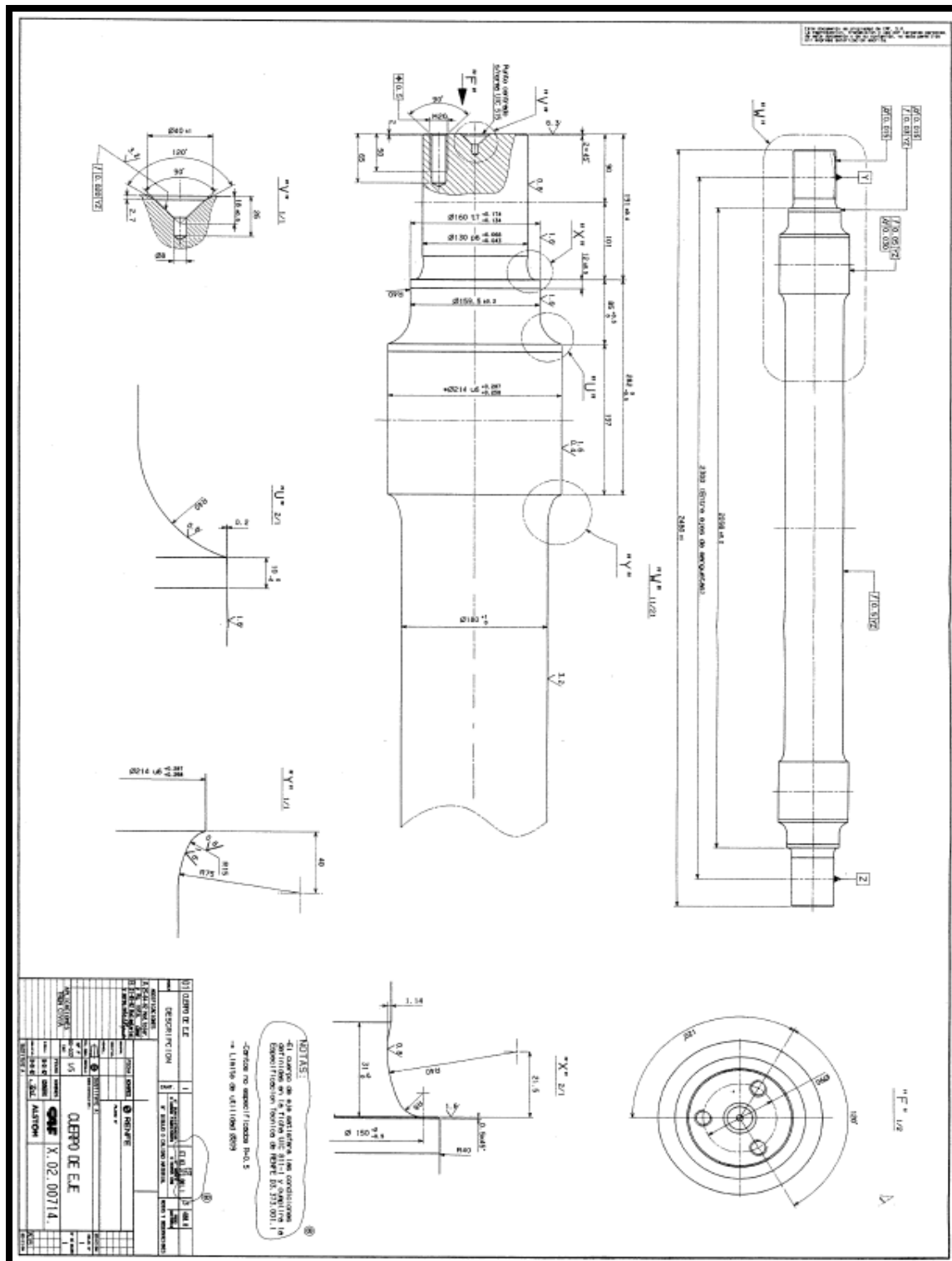


Figura 24. Plano del eje ferroviario

1. Ampliación del plano del eje ferroviario

Sección "W"

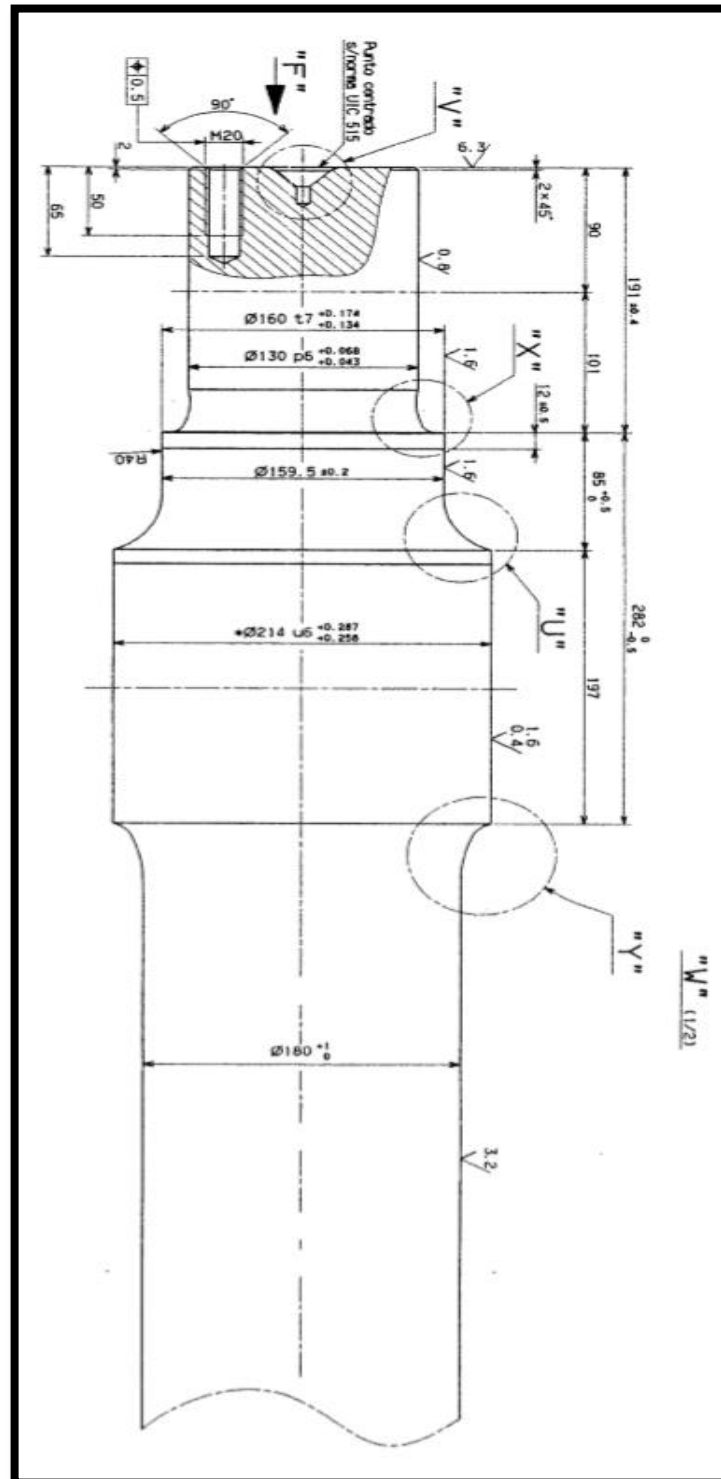


Figura 25. Sección "W" del plano del eje ferroviario

Sección "U"

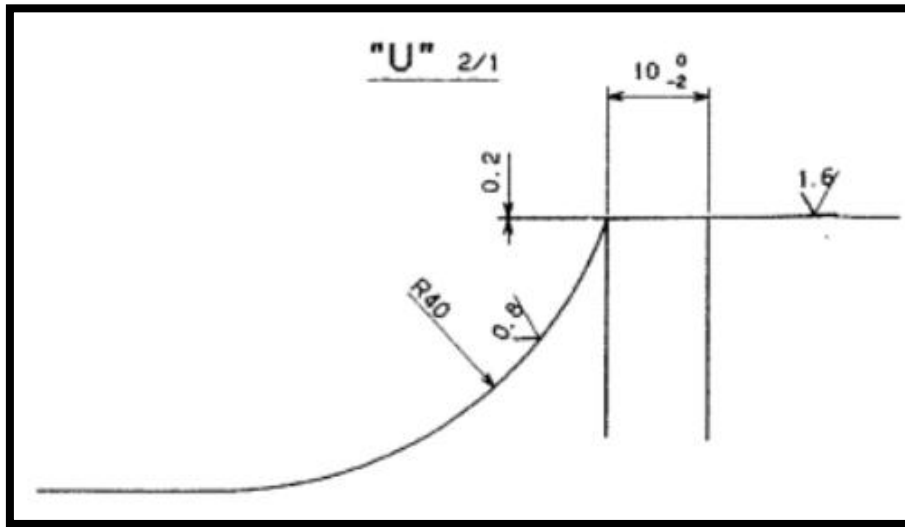


Figura 26. Sección "U" del plano del eje ferroviario

Sección "V"

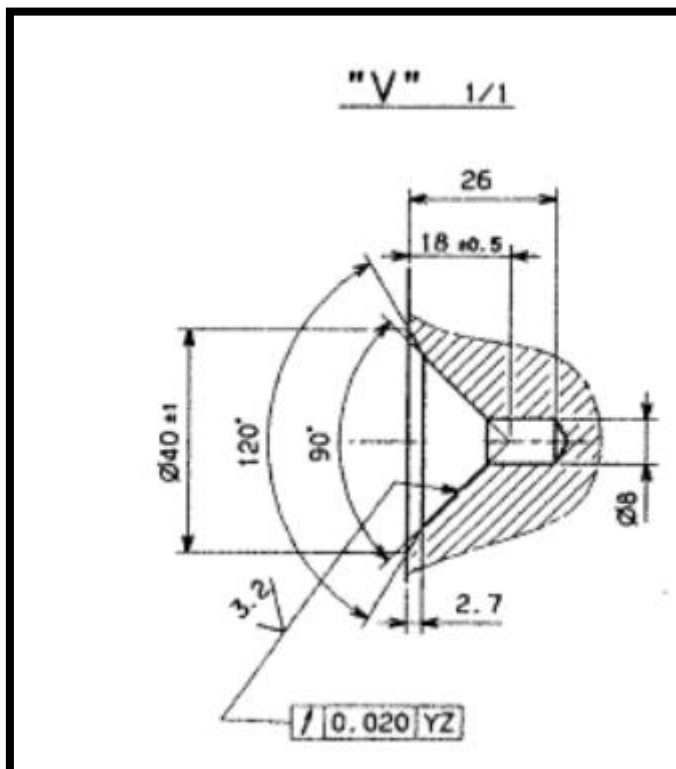


Figura 27. Sección "V" del plano del eje ferroviario

ANEXO B. FACTORES CONCENTRACIÓN DE TENSIÓN TEÓRICOS (K_T)

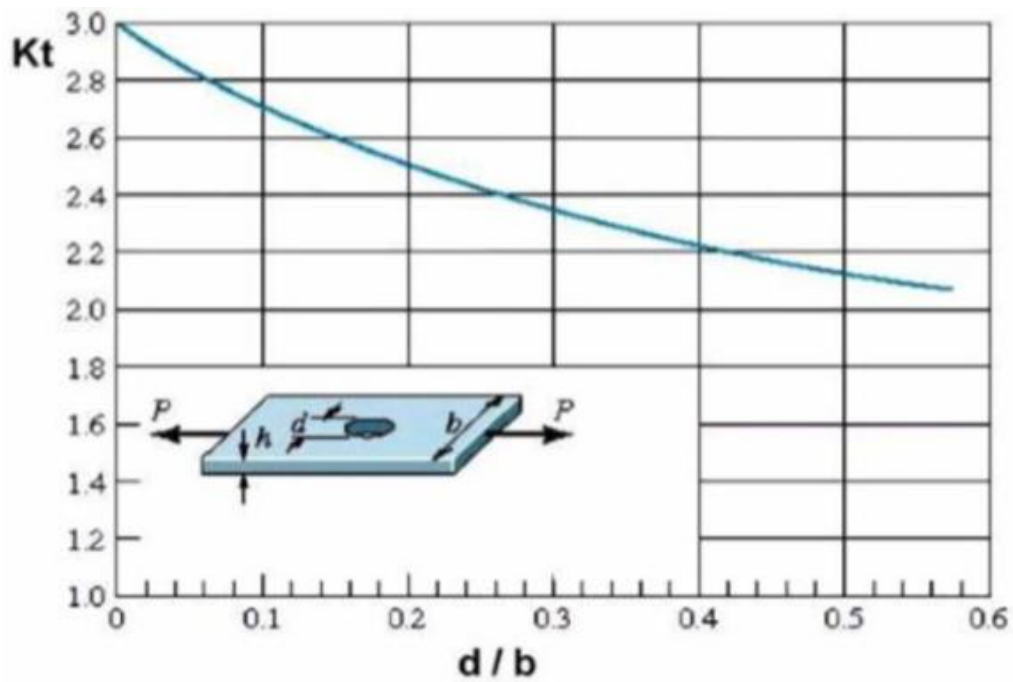


Figura 30. Barra rectangular con agujero transversal sometida a tracción o compresión

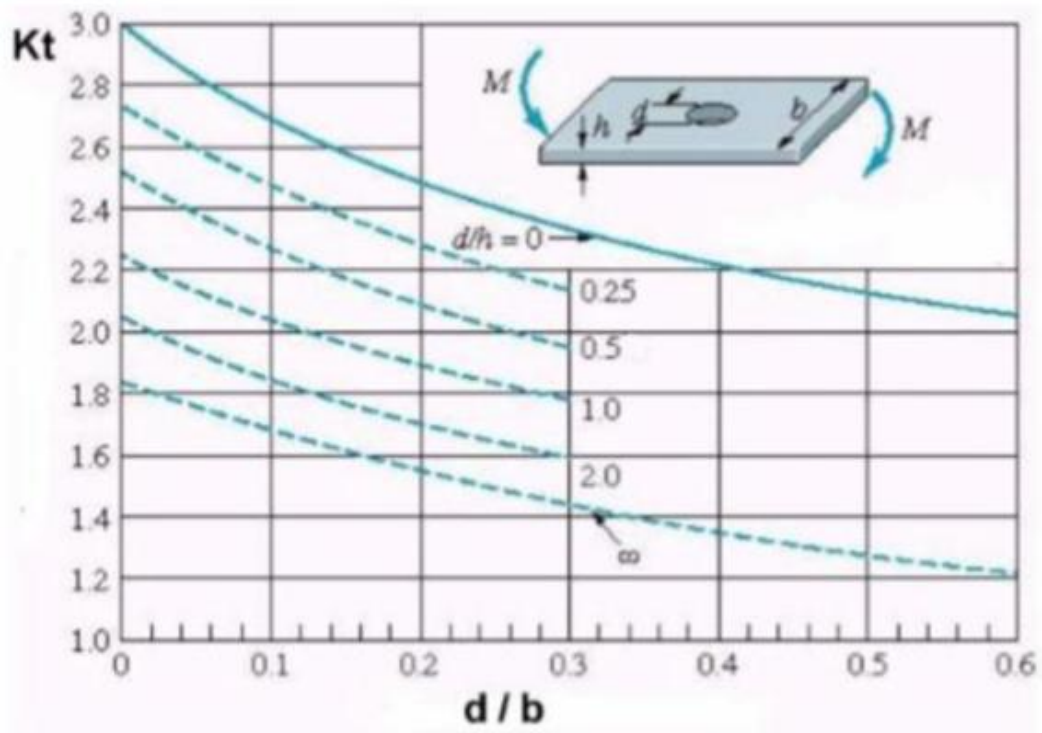


Figura 31. Barra rectangular con agujero transversal sometida a flexión simple

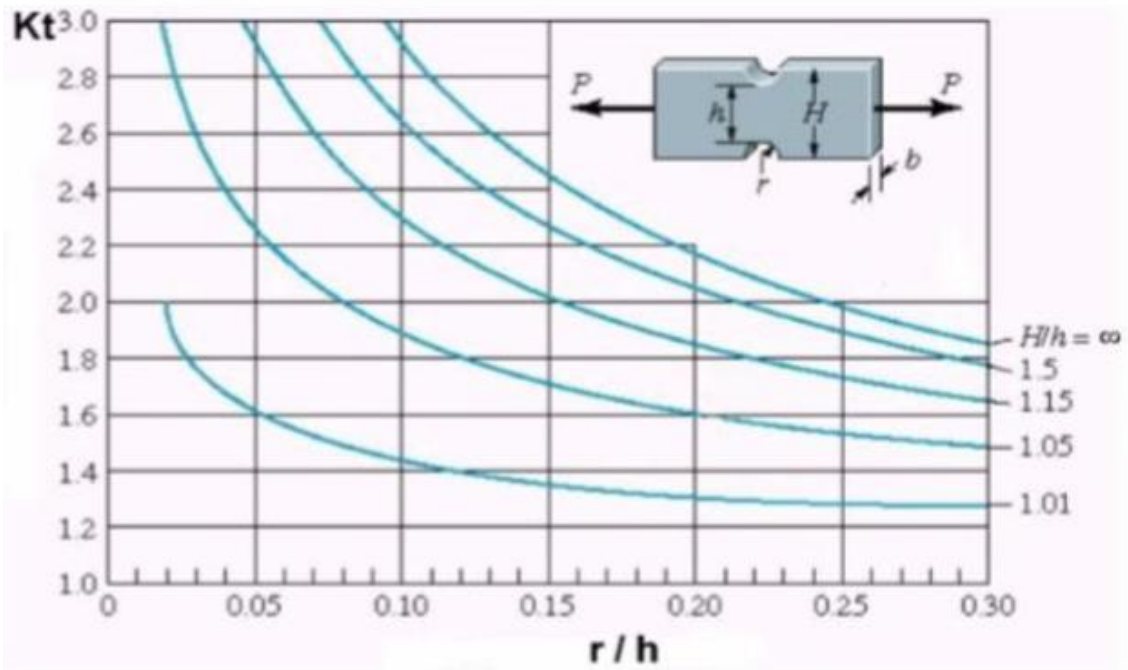


Figura 32. Barra rectangular con dos muescas sometida a tracción o compresión

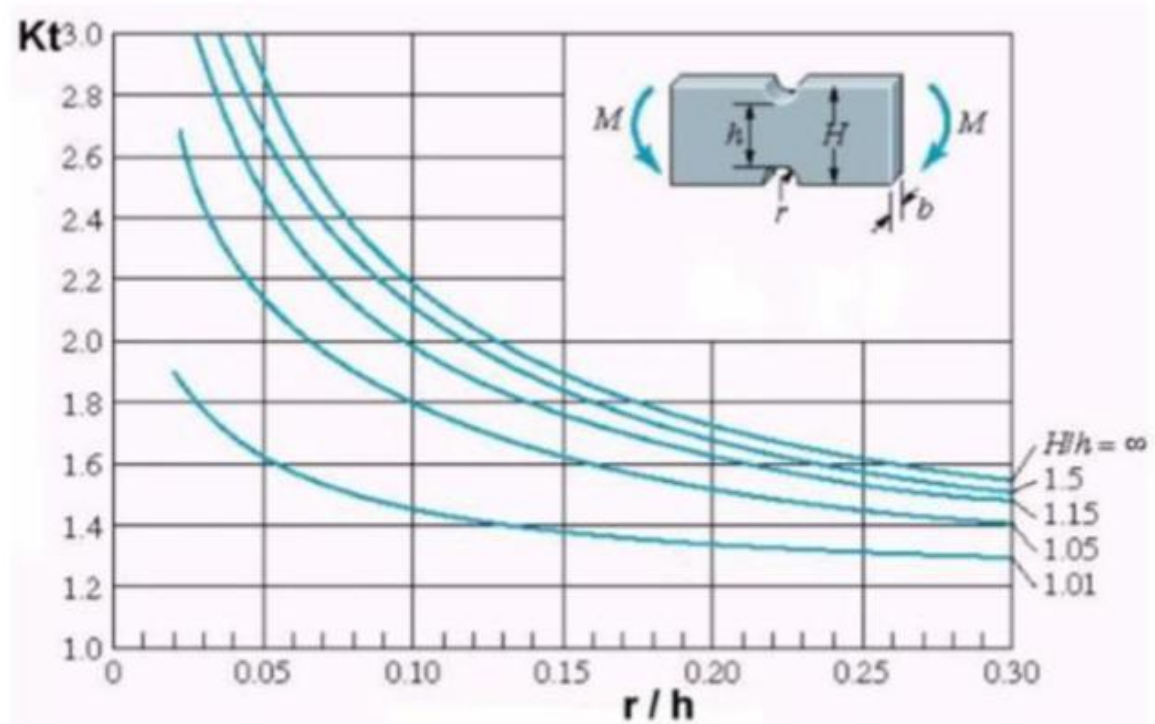


Figura 33. Barra con dos muescas sometida a flexión simple

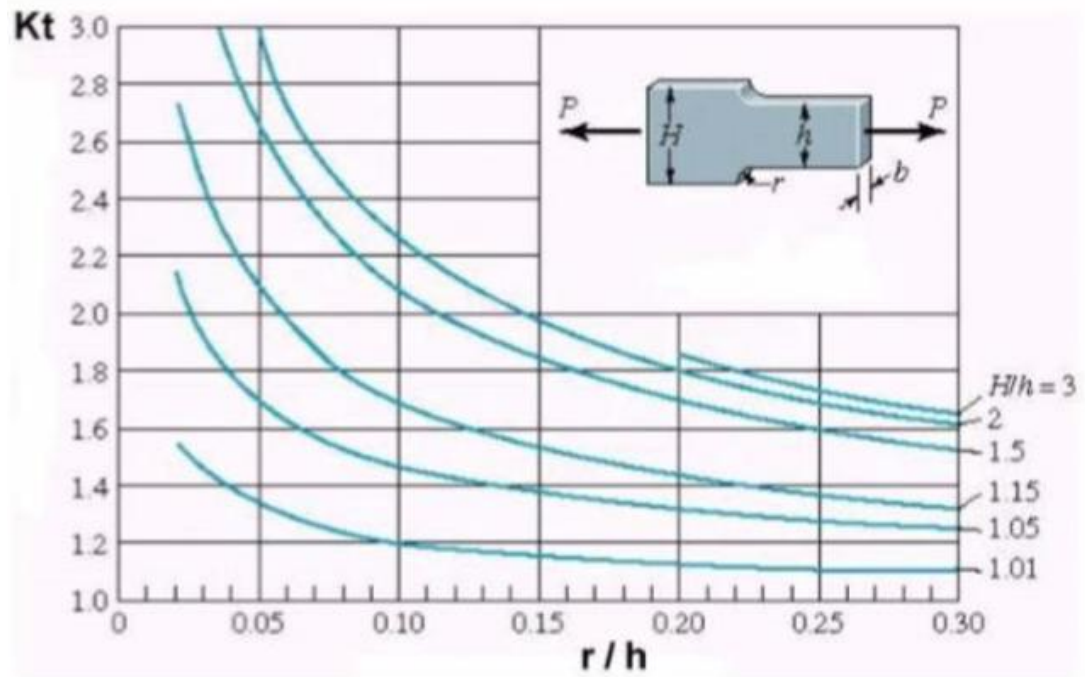


Figura 34. Barra rectangular con estrechamiento y entalles sometida a tracción o compresión

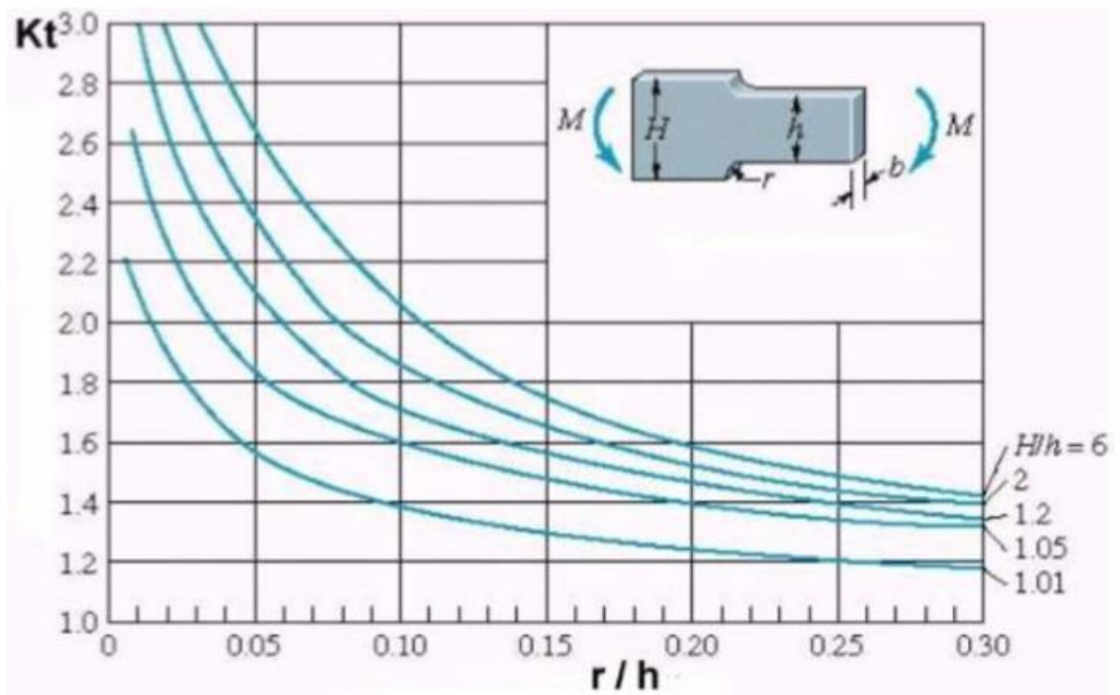


Figura 35. Barra con estrechamiento y entalles sometida a flexión simple

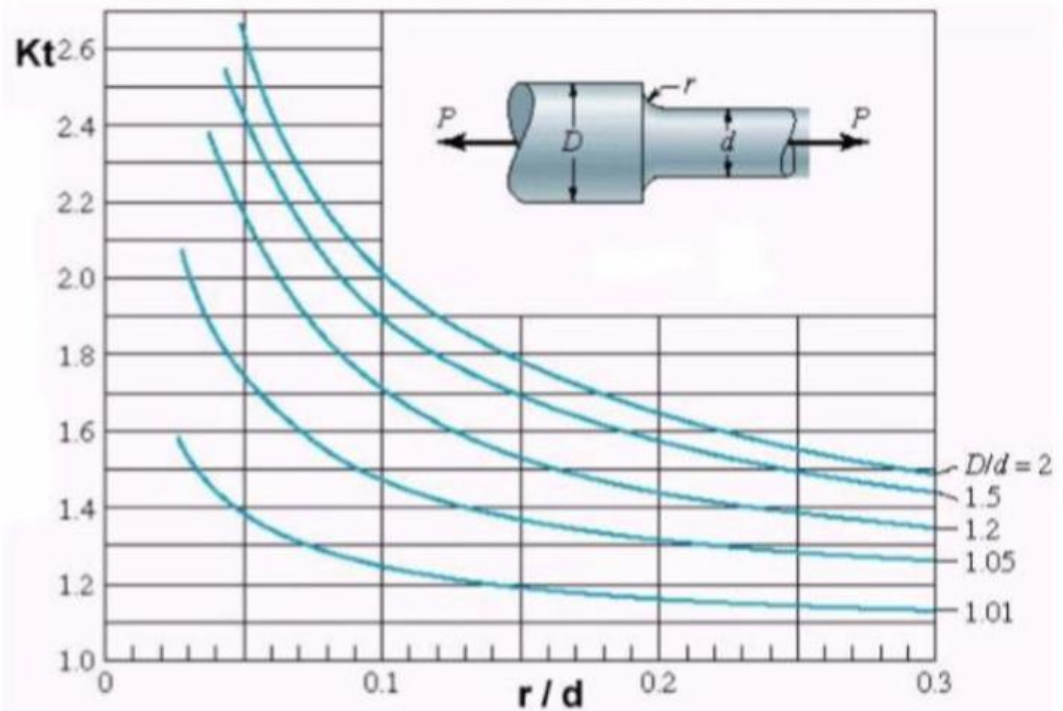


Figura 36. Barra de sección circular con estrechamiento y entalles sometida a tracción

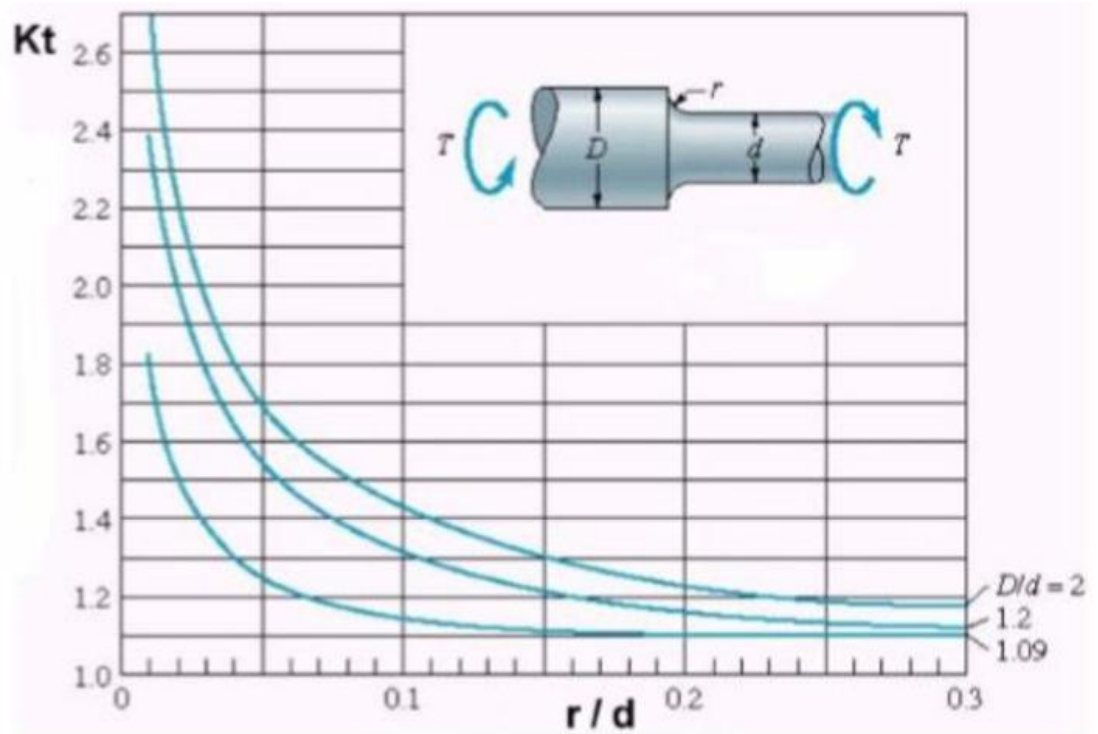


Figura 37. Barra de sección circular con estrechamiento y entalles sometida a torsor

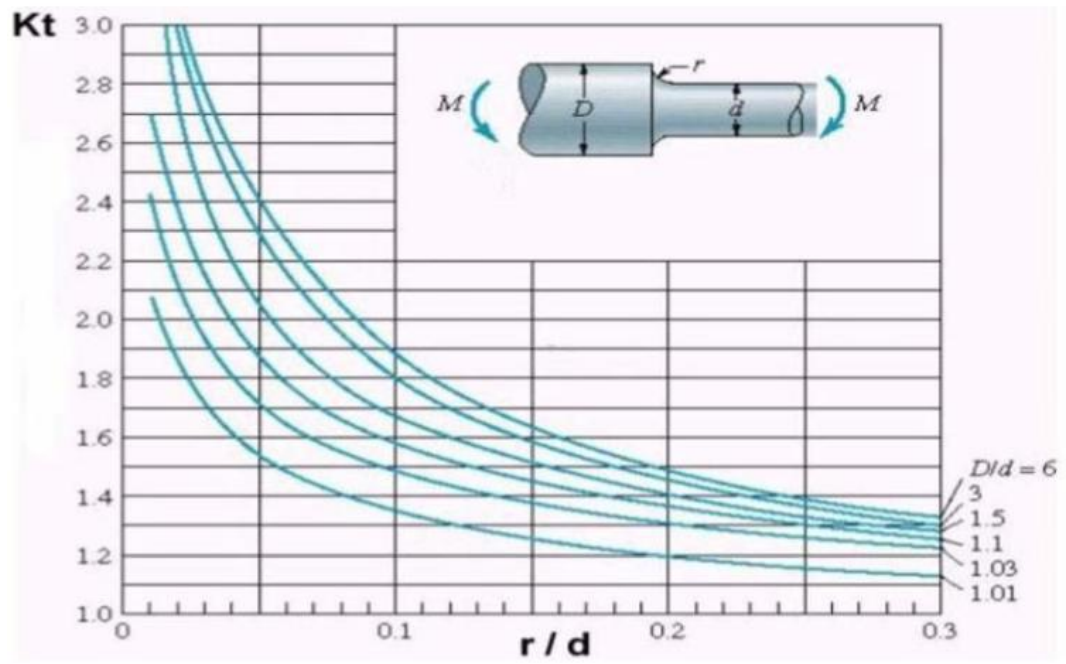


Figura 38. Barra de sección circular con estrechamiento y entalles sometida a flexión